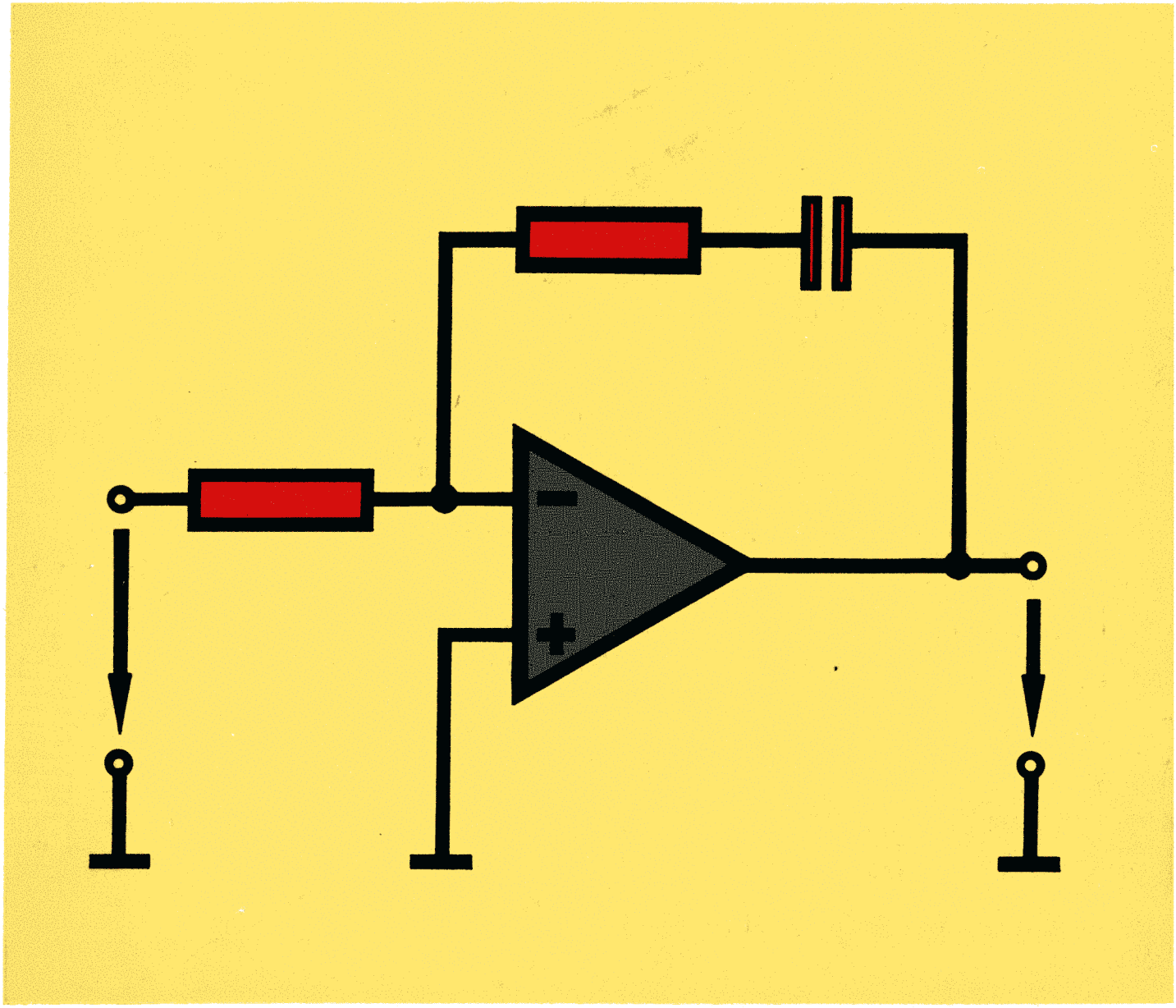
6
1982

msr

messen • steuern • regeln



25. Jahrgang
Heft 6
Juni 1982

Verlagspostamt Leipzig
EVP: 4,00 M

Index 32525
ISSN 0026-0347

VEB
Verlag Technik
Berlin

Informationstechnik

Signal, System, Information

Von Prof. Dr.-Ing. habil. Eugen-Georg Woschni

2., bearbeitete Auflage. 386 Seiten, 300 Bilder, 40 Tafeln, Leinen, 28,— M, Ausland 38,— M
Bestellangaben: 552623 3/Woschni, Inform. Technik

Thema des Buches ist die Beschreibung der mit den Begriffen Signal, System, Information verbundenen theoretischen Grundlagen. Die Darstellung ist so gehalten, daß sie unabhängig von einer bestimmten physikalischen Struktur ist, um damit die vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten der ursprünglich aus der Nachrichtentheorie stammenden Begriffe anzudeuten. Anhand zahlreicher praktischer Beispiele aus verschiedenen physikalischen und technischen Bereichen erhält der Leser ein anschauliches Bild von der Anwendbarkeit der dargestellten Theorien.

Der Autor beschränkt sich bewußt auf lineare Systeme und erreicht damit eine einheitliche und geschlossene Darstellung, die es ermöglichte, den umfangreichen Stoff in nur einem Band unterzubringen. Als erfahrener Hochschullehrer beherrscht er auch die Kunst des Weglassens von verwirrenden Einzelheiten. Er kennt die Verständnisschwierigkeiten, die beim Studium der einzelnen Theorien auftauchen, sehr genau und ist ständig bemüht, durch physikalisch-anschauliche Interpretation abstrakter mathematischer Begriffe diese Verständnisklippen überwinden zu helfen. Diesem Bestreben dienen auch die zahlreichen Übungsaufgaben und deren ausführliche Lösungen.

Die 2. Auflage enthält vor allem Korrekturen, die nach Erscheinen des Arbeitsbuches notwendig wurden. Die neu hinzugekommenen Tafeln verbessern die Übersichtlichkeit und erleichtern die Arbeit mit den mathematischen Verfahren. Als stoffliche Erweiterung wurden die Walsh-Funktionen und der Karnaugh-Veitch-Plan aufgenommen.

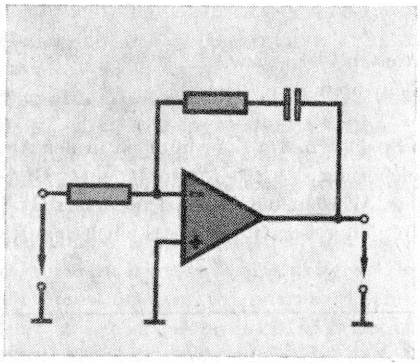
Hauptabschnitte des Buches: Überblick über die Aufgabenstellungen und technischen Realisierungen · Signal · System · Information · Signalwandlung: Kodierung und Modulation · Lösungen der Aufgaben.

Auslieferung durch den Fachbuchhandel

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

msr
messen · steuern · regeln

Wissenschaftlich-technische Zeitschrift für die Automatisierungstechnik



Operationsverstärker sind mehrstufige Gleichstromverstärker mit hoher Verstärkung und großer Bandbreite. Durch Beschaltung mit äußeren Bauelementen lassen sich unterschiedliche Verhaltensweisen der jeweiligen Gesamtanordnungen erzielen. Das führt zu einer großen Anpassungsfähigkeit an die verschiedensten Verwendungszwecke. So können durch entsprechende Beschaltung auch Regler, wie der oben dargestellte PI-Regler, aufgebaut werden. Zur Konzipierung von empfindlichen Meßverstärkern ist die Kenntnis der Rauscheigenschaften der verwendeten Operationsverstärker unumgänglich. Ein spezielles Verfahren zur Messung der spektralen Rauschdichte von Operationsverstärkern stellt der Beitrag auf S. 332 vor.

Titelgrafik: *G. Schwesinger*

Herausgeber:

Wissenschaftlich-Technische Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik (WGMA) in der KDT

Redaktionsbeirat:

Obering. G. F. Berg, Dr. rer. nat. A. Borgwardt, Dr.-Ing. E. h. W. Britall, Prof. Dr.-Ing. W. Fritzsch, Doz. Dr.-Ing. H. Fuchs, Dr. rer. nat. H. Gena, Dipl.-Ing. H. Gottschalk, Dr.-Ing. K. Hilscher, Prof. Dr.-Ing. habil. D. Hofmann, Dipl.-Ing. K. Keller, Prof. em. Dr. phil. nat. Dr.-Ing. E. h. H. Kindler, Dipl.-Phys. G. Meister, Dr.-Ing. J. Müller, Prof. Dr. sc. techn. R. Müller, Obering. K.-H. Nagel, Prof. Dr.-Ing. S. Pilz, Dr.-Ing. W. Reichel, Prof. Dr. sc. techn. K. Reinisch, Dr.-Ing. H. Schulze, Prof. Dr.-Ing. H. Töpfer, Prof. Dr. sc. oec. G. Viehweger

6

25. Jahrgang
Juni 1982

VEB
VERLAG TECHNIK

AUFSÄTZE

ISSN 0026-0347

302 *G. Früchtel*
Einsatz lernfähiger Steuerungsstrukturen zur effektiveren Nutzung statischer Prozeßoptimierungsalgorithmen für die On-line-Prozeßsteuerung

306 *K. Küßner* und *K. Martin*
Übersicht über numerische Verfahren zum Entwurf von optimalen Regelungen im Zustandsraum

311 *H. Zietz*
Vorschlag für eine allgemeine Koppelfunktion der Mehrgrößenstrecke und der Mehrgrößenregelung und Darstellung ihrer Eigenschaften am Beispiel der Dreigrößenregelung

315 *S. M. Zonkov*
Systeme mit Vergleichsmodell und veränderlicher Struktur

318 *D. Biedermann*
Verfahren der dezentralen Eigenwertverschiebung

322 *H. Reinhardt*
Dedizierte Prozeßdatensimulation — ein Beitrag zur Programmentwicklung auf Testprozeßrechnern

326 *H. Bandemer* und *M. Wächtler*
Entscheidungstheoretische Optimierung von Beobachtungs- und Entscheidungsverfahren für Zuverlässigkeitsprüfungen von Erzeugnissen

332 *R. Endter* und *H. Töpfer*
Messung der spektralen Rauschdichte von Operationsverstärkern mit Lock-in-Technik

336 *J. Dunkel*
Aufgabenstellung und Inhalt der Applikation elektronischer Bauelemente und die Stellung des VEB Applikationszentrum Elektronik Berlin (AEB) im Applikationsprozeß

339 **Programmierbare nichtnumerische Steuerungen (XVII)**

341 **KURZBEITRAG**

342 **AUS DER ARBEIT DER WGMA**

348 **TAGUNGEN UND KOLLOQUIEN**

350 **PATENTREFERATE**

352 **BUCHBESPRECHUNGEN**

357 **VORSCHAU UND KURZINFORMATIONEN**

3. US **NEUE BUCHER AUS DER UDSSR**

Dipl.-Ing. *G. Früchtel*, Leuna-Merseburg[1])

Einsatz lernfähiger Steuerungsstrukturen zur effektiveren Nutzung statischer Prozeßoptimierungsalgorithmen für die On-line-Prozeßsteuerung

IA 5.6.3.

0. Einleitung

Bei der Steuerung des stationären Verhaltens hat die Steuerungseinrichtung (STE) die Aufgabe, zu jedem Zeitpunkt einen geeigneten Steuervektor $\boldsymbol{u}$ bereitzustellen, der die Ausgangsgrößen $\boldsymbol{y}$ des Prozesses in einer gewünschten Weise beeinflußt, wobei auf den Prozeß zusätzlich nichterwünschte, unbeeinflußbare Störgrößen $\boldsymbol{z}$ wirken. Wird eine Steuerungseinrichtung mit statischen Optimierungsalgorithmen aufgebaut, ist für jeden Zeitpunkt das Extremum einer Zielfunktion

$$G = G(\boldsymbol{y}, \boldsymbol{u}) \tag{1}$$

bzw.

$$G = G'(\boldsymbol{z}, \boldsymbol{u}) \tag{2}$$

unter Berücksichtigung der Beschränkungsfunktionen

$$b_i(\boldsymbol{u}) \leqq 0, \; i = 1, \ldots, l \tag{3}$$

und damit der optimale Steuervektor $\boldsymbol{u} = \boldsymbol{u}^\circ$ zu bestimmen. Die Störgrößendynamik erlaubt dabei eine Diskretisierung des Problems, so daß die notwendigen Steuereingriffe (Veränderungen des Steuervektors) in bestimmten Zeitabständen erfolgen können. Die Optimierung selbst kann durch Suche an einem Prozeßmodell oder am Prozeß erfolgen.

Bei vielen verfahrenstechnischen Anwendungen statischer Optimierungsalgorithmen wird die Rechenzeit, d. h. die Zeit bis zur Bereitstellung des optimalen Steuervektors, sehr groß sein, da die Prozeßmodelle oft sehr kompliziert und nur auf iterativem Wege lösbar sind (bei Suche am Modell), die Prozesse i. allg. große Zeitkonstanten aufweisen (bei Suche am Prozeß) bzw. die Optimierungsalgorithmen selbst sehr zeitaufwendig sind (große Anzahl von Variablen usw.). Für eine On-line-Prozeßsteuerung können die statischen Prozeßoptimierungsalgorithmen also nur dann angewendet werden, wenn die Zeit zwischen zwei notwendigen Steuereingriffen größer ist als die zur Bestimmung des optimalen Steuervektors benötigte Zeit. Das ist jedoch nicht immer der Fall, vielmehr steht der optimale Steuervektor oft erst zur Verfügung, wenn sich die seiner Ermittlung zugrunde liegenden Bedingungen wieder verändert haben, so daß die Ausführung der berechneten Steuerung nicht mehr sinnvoll ist. Um einen Effektivitätsverlust zu verhindern, wird in einem solchen Fall die Anwendung einer derartigen Steuerungsstruktur nicht möglich sein. Aus diesem Grund wird eine Steuerungseinrichtung vorgeschlagen, die parallel zum Optimisator (0) ein lern- bzw. speicherfähiges Element vorsieht [1].

Dieses Element soll ein den Optimisator approximierendes lernfähiges Steuergesetz beinhalten und durch lern- bzw. speicherfähige Algorithmen erlernt bzw. angepaßt werden. Es hat die Aufgabe, nach Messung der Störgrößen innerhalb unerheblicher Rechenzeit einen zumindest suboptimalen Steuervektor $\hat{\boldsymbol{u}}$ bereitzustellen. Insbesondere ist die Anpassungsfähigkeit des Steuergesetzes (das gewissermaßen ein Optimisatormodell darstellt) notwendig, wenn die Prozesse zeitvarianten Charakter tragen bzw. die Prozeßmodelle im prozeßgekoppelten Betrieb nachgeführt werden.

1. Steuerungsstrukturen mit lern- bzw. speicherfähigen Elementen

Die effektivste Art zum Speichern von Zuordnungen in der Art $\hat{\boldsymbol{u}} = \hat{\boldsymbol{u}}(\boldsymbol{z})$ stellt die Speicherung der Koeffizienten eines Gleichungssystems (GLS) dar. Werden die Koeffizienten des GLS lern- oder anpassungsfähig ausgelegt, stellt dieses ein lernendes

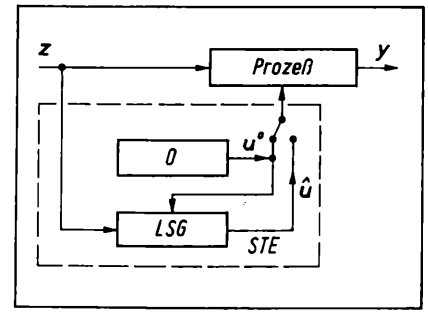


Bild 1. Lernende Steuerungseinrichtung mit lernendem Steuergesetz (LSG) in Gleichungssystemform

Steuergesetz (LSG) dar, und die Anwendung einer lernenden Steuerungsstruktur entsprechend Bild 1 ist möglich. Die Arbeitsweise kann wie folgt beschrieben werden:

Mit Hilfe des GLS wird für die anliegende Störsituation, beschrieben durch $\boldsymbol{z}$, sehr schnell ein suboptimaler Steuervektor $\hat{\boldsymbol{u}}$ berechnet. Der Prozeß wird dann zunächst mit $\hat{\boldsymbol{u}}$ gesteuert, bis der parallel dazu vom Optimisator ermittelte optimale Steuervektor $\boldsymbol{u}^\circ$ vorliegt. Danach erfolgt auch die Nachführung der Koeffizienten des GLS mit Hilfe eines Lernalgorithmus.

Dieser Funktionsablauf gilt für den Fall, daß sich die Störsituation am Eingang des Prozesses während der Abarbeitung der Steuerungsfunktionen, insbesondere während der langwierigen Optimierungsphase, nicht verändert. Die Abarbeitung wird unterbrochen, wenn eine Veränderung der Störsituation eintritt. In diesem Fall beginnt der Funktionsablauf von vorn. Die Genauigkeit des GLS hängt damit von der Anzahl der zu Ende geführten Optimierungsberechnungen ab. Es ist ersichtlich, daß bei sich schnell ändernden Störsituationen, wenn der Abschluß der Optimierung rechenzeitmäßig gar nicht möglich ist, trotzdem mit einem für die jeweilige Störsituation zumindest suboptimalen Steuervektor gesteuert werden kann.

Das Erlernen und Anpassen der Koeffizienten des GLS erfolgt mit bekannten rekursiven Algorithmen wie rekursiver Regression, stochastischer Approximation, Relaxation oder Quick und Dirty Regression, wobei die rekursive Regression die besten Approximationseigenschaften aufweist.

Aus folgenden Gründen wird angestrebt, für die Realisierung des LSG Gleichungen niedriger Ordnung (möglichst linear, bestenfalls quadratisch) zu verwenden.

[1]) Mitteilung aus der TH „Carl Schorlemmer" Leuna-Merseburg, Sektion Verfahrenstechnik, WB Automatisierungstechnik.

a) Die Berechnung von $\hat{u}$ erfolgt sehr schnell.
b) Die Anzahl der Koeffizienten steigt mit höherer Ordnung (besonders bei größerer Zahl der Störgrößen), das bedeutet langsame Konvergenz, die Notwendigkeit vieler Optimierungsberechnungen zum Erlernen des Steuergesetzes.
c) Die Lernalgorithmen enthalten Matrizenoperationen, das bedeutet lange Rechenzeiten bei vielen nachzuführenden Koeffizienten.

Es ist jedoch vielfach nicht möglich, mit Hilfe eines einzigen Gleichungssystems, bestehend aus derartigen einfachen Gleichungen für den gesamten Vektorraum der Störsituationen, ein LSG befriedigender Güte aufzubauen. Insbesondere kann ein befriedigendes Steuergesetz dann nicht erlernt werden, wenn der funktionelle Zusammenhang $\hat{u} = \hat{u}(z)$ zu kompliziert ist, d. h. stark nichtlinear oder stückweise linear mit Unstetigkeits- und Nichtdifferenzierbarkeitsstellen, dargestellt für den eindimensionalen Fall (Bilder 2a und 2b). Aus diesem Grunde wird die Möglichkeit vorgeschlagen, den Vektorraum der Störsituationen in Klassen oder Gebiete aufzuteilen und jeder Klasse jeweils ein Gleichungssystem niedriger Ordnung zuzuordnen, ebenfalls dargestellt im Bild 2.

Die anliegende Störsituation wird zunächst klassifiziert. Anschließend wird das zur entsprechenden Klasse gehörende Gleichungssystem verwendet, um den suboptimalen Steuervektor $\hat{u}$ zu berechnen. Die weitere Arbeitsweise erfolgt analog der Steuerungsstruktur mit nur einem Gleichungssystem. Belehrt bzw. nachgeführt wird nach Beendigung der Optimierung jedoch nur das zur entsprechenden Klasse gehörende Gleichungssystem. Es ist ersichtlich, daß mit dieser Struktur weitaus kompliziertere Zusammenhänge zwischen $\hat{u}$ und z approximiert werden können. Natürlich kann auch der Klassifikator selbst als lernfähiges Element ausgelegt sein.

Eine lernende Steuerungseinrichtung auf der Grundlage eines Klassifikators (K) und eines (Situations)-Reaktions-Speichers (SRS) ist im Bild 3 dargestellt (wobei eine Speicherung von Situationen nur zu erfolgen braucht, wenn die Klassifikation mit Mustervektoren erfolgt).

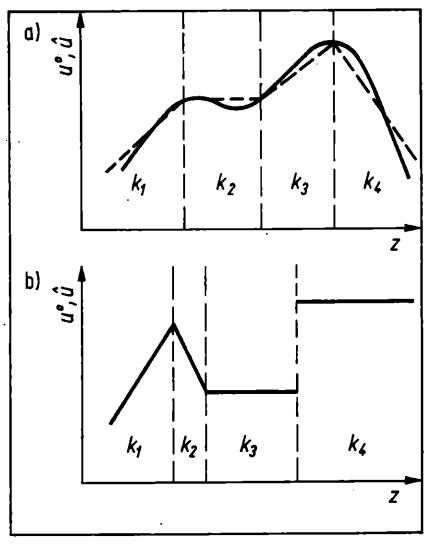


Bild 2. Unterteilung des Störgrößenraumes (in diesem Fall eindimensional)
a) einer stetigen Funktion, b) einer unstetigen Funktion

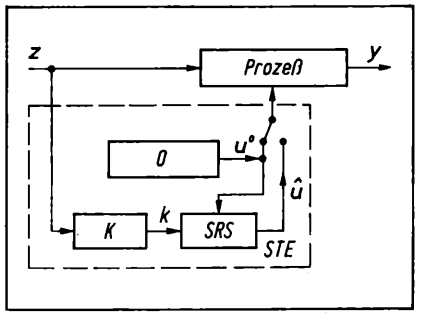


Bild 3. Lernende Steuerungseinrichtung mit Klassifikator (K) und Situations/Reaktions-Speicher (SRS)

z wird durch den Klassifikator K in eine vorgegebene Klasse k eingeordnet und der zugehörige Steuervektor $\hat{u}_k$ aus dem Reaktionsspeicher abgerufen. Der Optimisator 0 arbeitet wieder parallel dazu mit dem aktuellen Wert des Störvektors z und stellt nach Ablauf der Optimierungs-Rechenzeit den Steuervektor $u°$ bereit. Der Inhalt des SRS und damit letztendlich $\hat{u}_k$ wird im Verlaufe des Lernvorganges aus den Werten von $u°$ gebildet, die für alle zur Klasse k gehörenden Störsituationen gelten (z. B. durch Mittelwertbildung). Der Prozeß wird wieder so lange mit $\hat{u}_k$ gesteuert, bis der exakte Wert $u°$ vorliegt. Eine Sonderform dieser Steuerungseinrichtung liegt vor, wenn jede Klasse nur ein zusammengehöriges Vektorpaar z, $u°$ beinhaltet. Die Steuerungseinrichtung wird dann durch einen Matrixspeicher (z. B. reale oder simulierte Assoziativspeicher [2] oder Lernmatrizen [3]) realisiert.

Die Klassifikation kann auf der Grundlage von Mustervektoren oder Unterscheidungsfunktionen erfolgen.

Eine weitere Variante der Steuerungseinrichtung ist, wenn der Klassifikator selbst als lernfähiges Element ausgelegt ist und sich die Mustervektoren oder Unterscheidungsfunktionen aufgrund von im Zusammenhang mit der Optimierung erhaltenen Informationen über die Klassenzugehörigkeit selbst erarbeiten kann.

Die Zuordnung von $\hat{u}$ wird in diesem Fall durch eine geschätzte Klassenzuordnung $\hat{k}$ erfolgen. Die Belehrung des Systems erfolgt nach Berechnung von $u°$ und der wirklichen Klasse k wiederum durch bekannte Lern- bzw. Klassifikationsalgorithmen.

Als Voraussetzung für die Anwendung solcher Strukturen mit Klassifikator gilt allerdings, daß auf irgendeine Weise erhaltene diskrete Realisierungen des Steuervektors, d. h. eine endliche Zahl von Realisierungen vorliegen müssen. Die Störsituationsvektoren können analogen oder diskreten Charakter haben.

Erwähnt werden soll weiterhin die Kombination der Strukturen mit lernenden GLS und Situations/Reaktions-Speicher. Der Vorteil dieser Anordnung ist, daß typische feste (z. B. sich oft wiederholende) Situationen und Reaktionen erlernt werden können und für andere Klassen des Situationsraumes ein lernfähiges Steuergesetz zur Verfügung steht. Damit ist ebenfalls eine größere Variabilität gegenüber dem Signalcharakter von Stör- und Steuergrößen sowie gegenüber der geforderten Genauigkeit der einzelnen Zuordnungen gegeben. Es besteht außerdem die Möglichkeit zur Bildung neuer, durch Gleichungssysteme beschriebener Klassen, wenn die Anzahl der im Situations/Reaktions-Speicher gesammelten Daten zur Bildung eines neuen Steuergesetzes ausreicht.

Allgemein kann die Aufteilung des Störgrößenvektorraumes willkürlich oder durch den Algorithmus selbst erfolgen. Liegen keine A-priori-Informationen vor, erfolgt die willkürliche Klassenbildung durch das Festlegen orthogonaler Trennfunktionen im Störgrößenvektorraum oder durch Festlegung von gleichmäßig verteilten Mustervektoren (Rasterung). Ebenso ist es möglich, die Klassenbildung durch den Algorithmus selbst vornehmen zu lassen. Eine neue Klasse wird z. B. jeweils dann gebildet, wenn ein definiertes Abstandskriterium (der geometrische Abstand eines neuen Störvektors zu den Mustervektoren) ein bestimmtes Maß überschreitet [4]. In diesem Fall wird der Störvektor ein neuer Mustervektor. Schließlich muß noch bemerkt werden, daß der suboptimale Steuervektor, bevor er zur Steuerung verwendet wird, einer Kontrolle darüber unterzogen wird, ob Nebenbedingungen und Nichtnegativitätsbedingungen erfüllt sind. Werden Beschränkungen durch die Approximation überschritten, kann der suboptimale Steuervektor durch einfache, vorher festzulegende Vorschriften verschoben werden, bis die Nebenbedingungen erfüllt sind, oder er kann nicht zur Prozeßsteuerung herangezogen werden.

2. Anwendungsbeispiele

2.1. *Destillationskolonne*

Als eine typische verfahrenstechnische Anlage wurde eine Destillationskolonne gewählt. Das vereinfachte Schema zeigt Bild 4. Störgrößen sind der Einlaufstrom ME und das Einlaufmolverhältnis XE. Steuergrößen sind die Heizenthalpie am Sumpf QH (proportional dazu aufsteigende Dampfmenge DA) und der Rücklaufstrom MR. Zielgrößen sind die Ströme MK und MS am Kopf bzw. Sumpf der Kolonne mit den Konzentrationen XK bzw. XS. Als Zielfunktion wurde die Ausbeute am Kopf der Kolonne gewählt

$$G = MK \cdot XK \,. \tag{4}$$

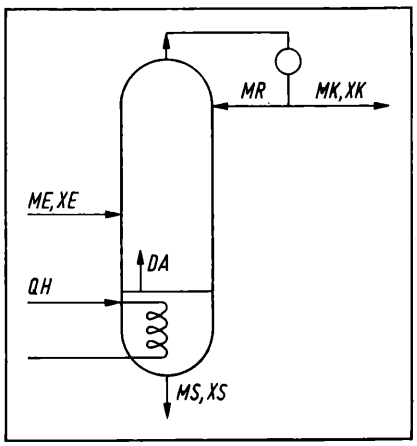


Bild 4. Vereinfachtes Schema der Destillationskolonne

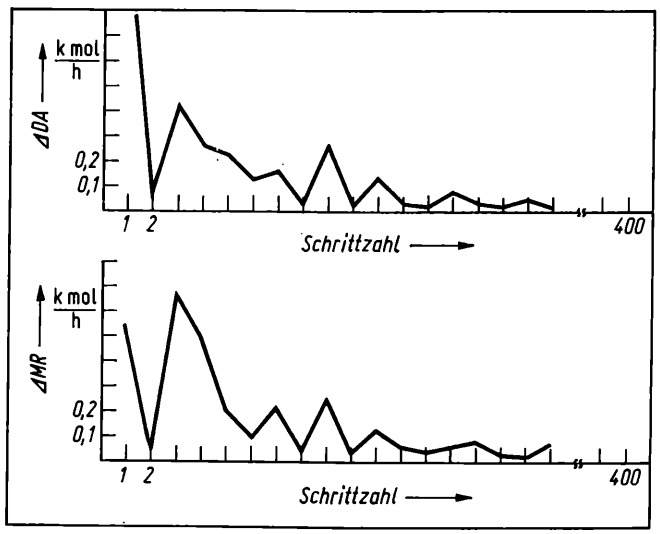
Der Optimisator hatte die Aufgabe, für eine anliegende Störsituation $z^T = (ME, XE)$ den optimalen Steuervektor $u^{0T} = (DA°, MR°)$ durch Anwendung eines Simplexalgorithmus an einem komplizierten, iterativ berechenbaren Prozeßmodell zu bestimmen. Die benötigte Rechenzeit dafür betrug auf einem Digitalrechner (R 21) etwa 10 min. Die Anwendung der lernfähigen Steuerungsstrukturen führt zu einer sofortigen Bereitstellung des Steuervektors. Bild 5 zeigt die Ergebnisse bei der Anwendung der Steuerungsstruktur mit lernendem GLS. Das GLS hat die Form:

$$\widehat{MR} = a_{10} + a_{11}ME + a_{12}XE \tag{5}$$

$$\widehat{DA} = a_{20} + a_{21}ME + a_{22}XE \,. \tag{6}$$

Dargestellt ist der Fehler $|MR° - \widehat{MR}|$ bzw. $|DA° - \widehat{DA}|$, den das LSG (mit einem GLS) gegenüber dem Optimisator

Bild 5. Zeitlicher Verlauf der Fehler $\Delta u_i = |u_i^0 - \hat{u}_i|$



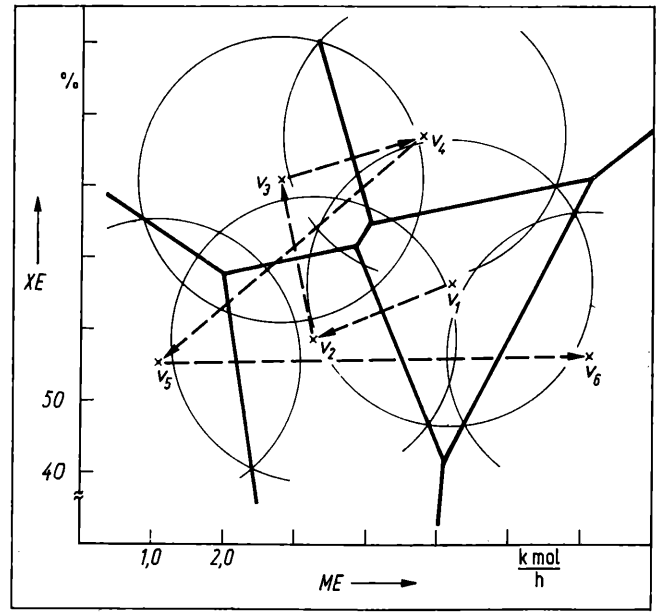


Bild 6. Entstehung der Klassen bei selbständiger Klassenbildung

— — → Weg des Störvektors im Laufe der Zeit; ——— entstehende implizite Trennfunktionen; $V_1 \ldots V_6$ gebildete Mustervektoren

macht. Die Güte des approximierten Steuergesetzes wird an der Fehlerquadratsumme der letzten 100 Meßwerte von insgesamt 400 gemessen. Diese dienen gewissermaßen als Prüffolge. Eine Verbesserung der Güte ließ sich bei der Verwendung der Steuerungsstruktur mit mehreren GLS und Klassifikator erreichen. Dazu wurde der Störgrößenvektorraum durch willkürliche Rasterung (orthogonale lineare Trennfunktionen) in 2 bis 4 Klassen aufgeteilt. Dabei ergab sich für 4 Klassen bereits eine Reduzierung der Fehlerquadratsumme auf 21% für MR und 24% für DA gegenüber den Ergebnissen nach Bild 5.

Die abgeschlossene Klassenbildung einer Steuerungsstruktur, die eine selbständige Klassenaufteilung vornimmt, ist im Bild 6 dargestellt. Die Klassifikation und Klassenbildung erfolgte mit Mustervektoren. Bei einem vorgegebenen Abstandskriterium und Überschreitungsmaß ergaben sich in diesem Fall 6 Klassen. Die Steuerungsergebnisse entsprechen denen der willkürlichen Klassenbildung.

Prinzipiell möglich ist auch die Anwendung der Steuerungsstruktur mit Klassifikator und Situations/Reaktions-Speicher. Liegen a priori keine Informationen über die zu einer Klasse gehörende Reaktion (Steuervektor) vor und wird auch kein zufälliger Steuervektor (z. B. der zuerst auftretende Steuervektor einer Klasse) gewählt, ist es sinnvoll, im Reaktionsspeicher die nachgeführten Mittelwerte der zur Klasse gehörenden Steuervektoren aufzubewahren. Für eine Klassenzahl von 4 wurden dabei Ergebnisse erzielt, die denen eines LSG mit einem GLS entsprechen.

Kann die Klassenbildung im Störgrößenvektorraum (Situationsraum) von vornherein nicht vorgenommen werden, oder ist auch die genannte selbstsuchende Klassenbildung nicht effektiv, kann der Klassifikator selbst lernfähig gestaltet werden. Als im Prozeßverlauf erhaltene Information kann bei Anwendung der Steuerungsstruktur mit lernendem Klassifikator und mehreren GLS beispielsweise der Fehler zwischen der optimalen Steuerreaktion und den durch die GLS berechneten suboptimalen Steuerreaktionen herangezogen werden. Die Situation wird derjenigen Klasse zugeordnet, bei der dieser Fehler am kleinsten ist, d. h., bei der für diese Situation das beste Modell existiert. Den Programmablaufplan eines derartigen Lernalgorithmus zeigt Bild 7. Die Klassenzahl ist vorher festzulegen. Es ergaben sich für 2, 3 und 4 Klassen Fehlerquadratsummen von 132%,

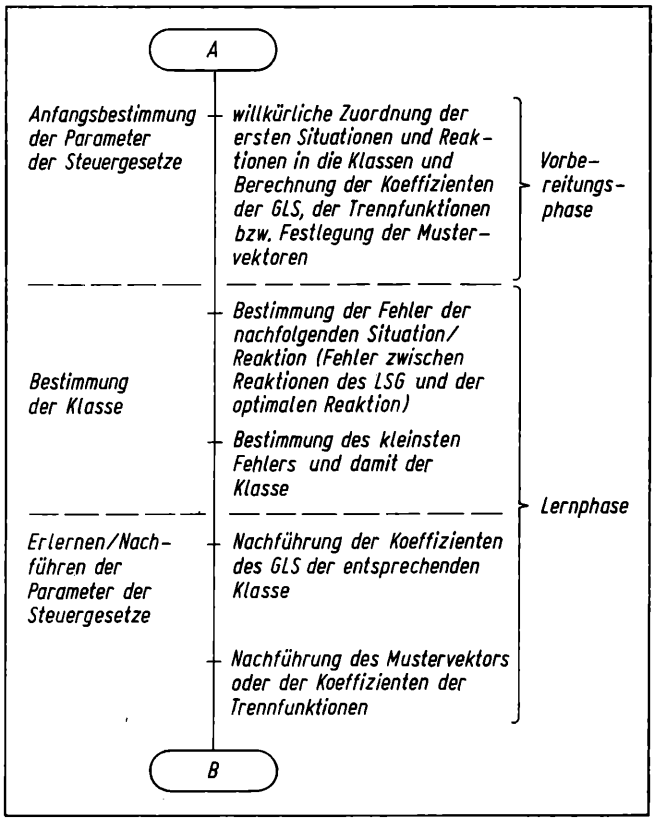


Bild 7. Programmablaufplan für selbständige Klassenbildung nach bestem Modell

96%, 28% für *MR* und 151%, 65%, 86% für *DA* gegenüber der Steuerungsstruktur mit nur einem GLS.

2.2. Brennstoffoptimierung eines Kraftwerkes

Bild 8 zeigt das Optimierungsproblem einer Brennstoffmischung [5]. Störgrößen sind die Heizwerte $H_1, \ldots, H_4$ der Brennstoffe, als Steuergrößen können die Volumenströme $\dot{V}_1, \ldots, \dot{V}_4$ betrachtet werden. Die zu minimierende Zielfunktion sind die Kosten der Brennstoffmischung

$$G = 2{,}0\ \dot{V}_1 + \dot{V}_2 + 1{,}2\ \dot{V}_3 + 1{,}6\ \dot{V}_4 . \qquad (7)$$

Es wurden 200 verschiedene Störsituationen mit Hilfe eines Zufallsgenerators simuliert.

Als Nebenbedingungen gelten weiterhin verschiedene technische oder ökonomisch bedingte Einschränkungen. Das Problem ergibt sich als Linearoptimierungsproblem und ist daher zur Anwendung einer Steuerungsstruktur mit lernendem Klassifikator und mehreren GLS entsprechend Bild 2b geeignet. Der Optimisator wird ebenfalls wieder durch einen Simplex-Algorithmus realisiert.

Wie bereits erwähnt, kann der lernende Klassifikator seine Informationen während des Prozeßverlaufes auf verschiedene Weise erhalten. Eine weitere Möglichkeit stellt daher die Aufteilung des Steuerraumes nach bestimmten Kriterien dar, die zum Erlernen der Klassifikation im Störgrößenvektorraum herangezogen werden kann.

Die Aufteilung kann wiederum willkürlich erfolgen, indem der Steuervektorraum gerastert wird, in der Annahme, daß benachbarte Steuerreaktionen durch benachbarte Störsituationen hervorgerufen werden, und der Annahme, daß benachbarte Steuerreaktionen günstig durch ein gemeinsames Modell approximiert werden können. Andererseits kann eine Aufteilung auch erfolgen, indem bestimmte Anhäufungen von Steuerreaktionen in der Vorbereitungsphase oder am Anfang der Lernphase erkannt und zur Klassenbildung herangezogen werden. Diese Reaktionsanhäufungen treten insbesondere bei Linearoptimierungsproblemen auf. Nach diesem Prinzip wurde eine Steuerungsstruktur mit lernendem Klassifikator und LSG, bestehend aus mehreren GLS, aufgebaut.

Die Modelle der einzelnen Klassen hatten die Form

$$\dot{V}_i = a_{0i} + a_{1i}H_1 + a_{2i}H_2 + a_{3i}H_3 + a_{4i}H_4 + a_{5i}H_1^2 + a_{6i}H_2^2 + a_{7i}H_3^2 + a_{8i}H_4^2 \qquad i = 1, \ldots, 4 . \qquad (8)$$

Die Koeffizienten wurden mit rekursiver Regression berechnet. Der Klassifikator wurde einmal mit Trennfunktionen und einmal mit Mustervektoren realisiert, wobei die Trennfunktionen die gleiche Struktur wie die Klassenmodelle aufwiesen.

Im Bild 9 sind für eine Steuergröße die Fehlentscheidungen bei einer Klassifikation mit Trennfunktionen bei 4 (Bild 9a) bzw. 2 zu unterscheidenden Klassen (Bild 9b) dargestellt. Anhand der Darstellung ist ersichtlich, daß der Klassifikator im Laufe der Zeit immer weniger Fehlzuordnungen vornimmt und daß die Anzahl der getroffenen Fehlentscheidungen von der Klassenzahl abhängt.

Bei einer Klassifikation mit Mustervektoren wurden schlechtere Ergebnisse erzielt, wobei die Gründe dafür darin zu suchen sind, daß bei Mustervektoren praktisch mit linearen Trennfunktionen gearbeitet wird, im konkreten Fall jedoch Trennfunktionen mit mindestens quadratischer Struktur zweckmäßiger waren.

Die Bewertung der Güte erfolgte durch die Aufsummierung des Gütekriteriums Kosten *G* über einen längeren Zeitraum nach einer „Anlernphase". Der Güteverlust (Kostenzuwachs) gegenüber der optimalen Fahrweise betrug bei einer Struktur mit nur einem GLS, also ohne Klassifikator 5,41%, bei einer Unterteilung in 2 Klassen 5,37%, in 3 Klassen 5,10% und in 4 Klassen 2,14%. Bei weiterer Erhöhung der Klassenzahl war durch die Erhöhung der Zahl der Fehlentscheidungen wieder eine Verschlechterung zu verzeichnen.

Zusammenfassung

Durch die Klassifizierung kann bei der Modellbildung erreicht werden, mit einfachen Approximationsvorschriften, wie linearen Gleichungen, nachgeführten Mittelwerten oder Festwerten auszukommen. Die Möglichkeiten der Klassenbildung sind in der Tafel dargestellt.

Werden die Modelle durch Gleichungen realisiert, ist die Modellgüte abhängig von der Klassenanzahl, wobei ein Optimum existiert, da mit steigender Klassenanzahl das Gesamtmodell zu

Bild 8. Vereinfachtes Schema der Brennstoffmischung

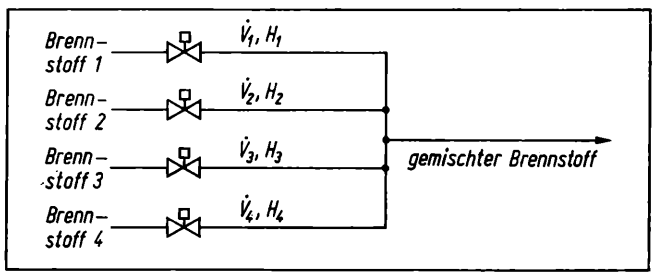
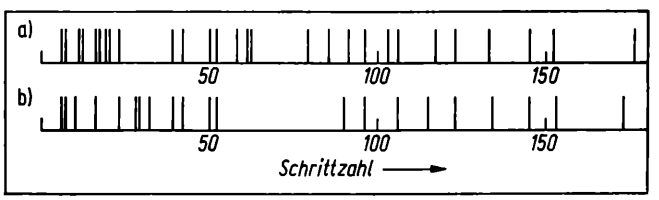


Bild 9. Diagramm der Lerntätigkeit des Klassifikators in der Anfangsphase (dargestellt sind die Fehlzuordnungen bzw. nicht eindeutigen Zuordnungen)

a) bei Verwendung von Trennfunktionen mit 4 Klassen, b) bei Verwendung von Trennfunktionen mit 2 Klassen



langsam konvergiert, d. h., ein Modell ausreichender Güte erst nach sehr vielen Meßpunkten (Störsituationen) erhalten wird bzw. bei lernenden Klassifikatoren die Anzahl der Fehlzuordnungen größer wird. Ein weiterer Vorteil der vorgeschlagenen Steuerungsstruktur ist, daß der suboptimale Steuervektor als Startpunktvorgabe für die Optimierungsberechnung sowohl bei Vorwärtsoptimierung als auch bei Rückwärtsoptimierung verwendet werden kann. Damit verkürzt sich die Zeit bis zum Finden des Optimums (bei Suche am Prozeß) bzw. der Rechenzeit (bei Suche am Prozeßmodell), was i. allg. mit einer besseren Produktqualität identisch sein wird.

Tafel. Möglichkeiten der Klassenbildung

	Klassenbildung	
im Situationsraum	im Reaktionsraum	sonstige
– willkürlich (z. B. Rasterbildung) – nach A-priori-Informationen – selbst klassenbildend		
Abbildung auf den Situationsraum durch Lernalgorithmen	– willkürlich (z. B. Rasterbildung) – nach A-priori-Informationen – nach Informationen zur Verteilungsdichte im Reaktionsraum (z. B. Anhäufungen)	– nach dem am besten approximierenden Modell

Literatur

[1] *Sokollik, F.; Schütte, J.; Früchtel, G.:* Bausteine einer Funktionshierarchie zur On-line-Steuerung verfahrenstechnischer Systeme. Tagungsunterlagen 24. IWK, TH Ilmenau 1979.

[2] *Tsui, F. F.:* Der Assoziativspeicher – Anwendung und Realisierungsmöglichkeiten. Frequenz **20** (1966) H. 3.

[3] *Steinbuch, K.:* Die Lernmatrix. Kybernetik **1** (1961) H. 1.

[4] *Sprenger, H. J.:* Ein Beitrag zum Entwurf lernender Steuerungssysteme für die statische Prozeßoptimierung. Dissertation, TH Ilmenau 1972.

[5] *Richter, K. J.:* Methoden der Optimierung, Bd. 1: Lineare Optimierung. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1971.

msr 7530

Dr.-Ing. *K. Küßner* und Dr.-Ing. *K. Martin*, Dresden[1])

Übersicht über numerische Verfahren zum Entwurf von optimalen Regelungen im Zustandsraum

IA 2.3.1.0.

1. Problemstellung

Die Zustandsraummethoden haben sich zu einem wirksamen Handwerkszeug beim Entwurf von linearen Mehrgrößenregelungen entwickelt. Die im Laufe der Jahre entstandenen Entwurfsverfahren sind gut geeignet, komplizierte Regelungsaufgaben der Praxis erfolgreich zu lösen. Voraussetzung dazu sind leistungsfähige numerische Verfahren und Programme, die insbesondere auch bei Systemen hoher Ordnung befriedigende Ergebnisse liefern müssen. Der Beitrag soll einen Überblick über numerisch günstige Verfahren zum Entwurf von Zustands- und Ausgangsrückführungen geben. Sie liegen als Programmpaket [1] vor und wurden an umfangreichen Problemen erprobt [39]. Die betrachteten Verfahren gehören im wesentlichen in das Gebiet der linearen optimalen Steuerung [2] und [3] (lineares System, quadratisches Gütekriterium). Methoden der Polzuweisung [4] wurden nicht berührt.

Obwohl die Verfahren zum Entwurf von Zustandsrückführungen (ZRF) eine gewisse Vollendung gefunden haben, sind sie in realen technischen Systemen kaum praktikabel, da i. allg. nicht sämtliche Zustandsgrößen verfügbar sind. Sie bilden oftmals jedoch die Grundlage für weitere Entwurfsschritte. Die Alternative dazu stellen Ausgangsrückführungen (ARF) dar. Bei ihnen werden nur meßbare Ausgangsgrößen zurückgeführt. Der Beitrag beschränkt sich auf den Entwurf proportionaler ARF; Beobachter und dynamische Kompensatoren werden nicht betrachtet. Zusätzliche Strukturbeschränkungen des Reglers (dezentrale Regelungen) können berücksichtigt werden. Wenn auch z. Z. noch nicht alle damit zusammenhängenden theoretischen und praktischen Fragen beantwortet werden können, sind doch in den letzten Jahren eine Reihe brauchbarer numerischer Verfahren entstanden, auf die hier eingegangen werden soll.

2. Allgemeine Problematik des Entwurfs von Regelungen im Zustandsraum

Das Modell der Regelstrecke sei in Form linearer Zustandsgleichungen mit konstanten Koeffizienten

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}\,, \quad \boldsymbol{x}(0) = \boldsymbol{x}_0 \tag{1}$$

gegeben. Dabei ist

$\boldsymbol{x}$: der n-Zustandsvektor,
$\boldsymbol{u}$: der r-Steuervektor.

Die Matrizen $\boldsymbol{A}$ und $\boldsymbol{B}$ sind von entsprechenden Dimensionen. Das System (1) wird als vollständig steuerbar vorausgesetzt. Die Theorie der linearen optimalen Steuerung sucht diejenige Steuerung $\boldsymbol{u}(t)$ in $[0, \infty)$, die das quadratische Gütekriterium

$$J(\boldsymbol{u}(\cdot), \boldsymbol{x}_0) = \tfrac{1}{2} \int_0^\infty (\boldsymbol{x}^T \boldsymbol{Q}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{u}^T \boldsymbol{R}\boldsymbol{u})\, \mathrm{d}t \tag{2}$$

minimiert. Ist $\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{C}_\mathrm{k}^T \boldsymbol{Q}_\mathrm{y} \boldsymbol{C}_\mathrm{k}$ und

$$\boldsymbol{y}_\mathrm{k} = \boldsymbol{C}_\mathrm{k}\boldsymbol{x} \tag{3}$$

ein s-Vektor von Größen, die im Gütekriterium bewertet werden sollen, so gilt $\boldsymbol{x}^T\boldsymbol{Q}\boldsymbol{x} = \boldsymbol{y}_\mathrm{k}^T \boldsymbol{Q}_\mathrm{y} \boldsymbol{y}_\mathrm{k}$. Die Matrizen $\boldsymbol{Q}$ und $\boldsymbol{R}$ sind symmetrisch und positiv semidefinit bzw. positiv definit. Weiterhin sind der Vektor $\boldsymbol{y}_\mathrm{k}$ und die Bewertungsmatrix $\boldsymbol{Q}_\mathrm{y}$ so zu wäh-

[1]) Mitteilung aus der AdW der DDR, Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse, Bereich Regelungssysteme.

len, daß sämtliche Eigenbewegungen des Systems (1) in das Gütekriterium (2) eingehen [2]. Ausgehend von den meist verbal formulierten Güteforderungen an das Führungs- oder Störverhalten des Systems werden die Bewertungsmatrizen $\boldsymbol{Q}_y$ und $\boldsymbol{R}$ festgelegt [39] [54] und [55]. Dies geschieht zweckmäßig iterativ und im Dialog.

Die im Ergebnis der Minimierung des Gütekriteriums (2) erhaltene optimale Steuerung kann als zeitunabhängige Linearkombination sämtlicher Zustandsgrößen (proportionale Zustandsrückführung)

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{K}\boldsymbol{x} \tag{4}$$

dargestellt werden [2] [3] [5], bis [7]. Auf numerische Verfahren zur Berechnung der Rückführmatrix $\boldsymbol{K}$ wird im Abschn. 3. eingegangen.

Wie bereits eingangs erwähnt, stehen zur Rückführung gewöhnlich nur die Ausgangsgrößen des Systems

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}\,, \tag{5}$$

deren Anzahl m kleiner als die Systemordnung n ist, zur Verfügung. Der Vektor $\boldsymbol{y}$ kann sowohl die eigentlichen Regelgrößen als auch zusätzliche, durch laufende Messung erfaßte Größen (Hilfsregelgrößen) enthalten. Die einfachste Art der Rückführung ist dann die proportionale ARF

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{K}_y\boldsymbol{y}\,, \tag{6}$$

bei der auf jeden Steuereingang eine Linearkombination der Ausgangsgrößen $\boldsymbol{y}$ geschaltet wird. Numerische Verfahren zur Bestimmung von $\boldsymbol{K}_y$ bilden den Hauptinhalt des Beitrags (s. Abschn. 4.).

Das Konzept der proportionalen ARF verzichtet zugunsten einfach realisierbarer Regler bewußt auf eine Zustandsrekonstruktion (Beobachter [7] und [8], vollständige dynamische Kompensatoren [9] und [10], die auf komplizierte Regler hoher Ordnung führen). Nachteilig ist jedoch, daß das System mit einer Reglerstruktur (6) nicht stabilisierbar sein muß und daß explizite Kriterien zur Ermittlung dieser Fälle nicht bekannt sind.

Der Entwurf von Reglern mit I-Anteilen sowie von dynamischen Kompensatoren vorgegebener Ordnung kann auf das Problem (6) zurückgeführt werden [11] bis [13].

3. Zustandsrückführung

Zur numerischen Bestimmung der Matrix $\boldsymbol{K}$ in Gl. (4) sind eine Vielzahl von Lösungsverfahren bekannt geworden. Im folgenden soll lediglich auf zwei bewährte Verfahren eingegangen werden, die auf der Auswertung der Optimalitätsbedingungen für das Problem (1) und (2) beruhen. Sie haben hier die Gestalt einer quadratischen Matrizengleichung (Riccati-Gleichung)

$$\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{P} + \boldsymbol{P}\boldsymbol{A} - \boldsymbol{P}\boldsymbol{S}\boldsymbol{P} + \boldsymbol{Q} = 0 \tag{7}$$

mit

$$\boldsymbol{S} = \boldsymbol{B}\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}^T. \tag{8}$$

Mit der positiv definiten Lösung $\boldsymbol{P}$ ((n,n)-Matrix) von Gl. (7) folgt

$$\boldsymbol{K} = -\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{B}^T\boldsymbol{P} \tag{9}$$

sowie der optimale Gütewert

$$J_{\text{opt}} = \boldsymbol{x}_0^T\boldsymbol{P}\boldsymbol{x}_0\,.$$

3.1. Eigenwertverfahren

Die Anwendung dieses Verfahrens in der Theorie der optimalen Steuerung geht auf [5] und [6] zurück. Die Grundgedanken sind bereits in [14] (s. auch [15]) zu finden. Eine klare Darstellung gibt [16].

Das Verfahren beruht auf einer Ähnlichkeitstransformation der $(2n, 2n)$-Koeffizientenmatrix

$$\boldsymbol{M} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{A} & -\boldsymbol{S} \\ -\boldsymbol{Q} & -\boldsymbol{A}^T \end{pmatrix} \tag{10}$$

des Hamiltonschen kanonischen Systems auf ihre Diagonalform

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{T}_{11} & \boldsymbol{T}_{12} \\ \boldsymbol{T}_{21} & \boldsymbol{T}_{22} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \boldsymbol{D}_- & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{D}_+ \end{pmatrix} = \boldsymbol{M}\begin{pmatrix} \boldsymbol{T}_{11} & \boldsymbol{T}_{12} \\ \boldsymbol{T}_{21} & \boldsymbol{T}_{22} \end{pmatrix}. \tag{11}$$

Die Eigenwerte von $\boldsymbol{M}$ liegen symmetrisch zur imaginären Achse; $\boldsymbol{D}_+$ enthält die Eigenwerte mit positivem und $\boldsymbol{D}_-$ die mit negativem Realteil, wobei letztere gleichzeitig die des geschlossenen Systems $\boldsymbol{A} - \boldsymbol{S}\boldsymbol{P} = \boldsymbol{A} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{K}$ darstellen. Nach [16] gilt

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{T}_{21}\boldsymbol{T}_{11}^{-1}\,. \tag{12}$$

Zur Berechnung der Eigenwerte und Eigenvektoren der Matrix $\boldsymbol{M}$ nach Gl. (10) hat sich der QR-Algorithmus [17] mit vorangehender Balancierung und Transformation auf die Hessenberg-Form sehr gut bewährt [1]. Eine besondere Berücksichtigung der oben angeführten Eigenwertsymmetrie im QR-Algorithmus bringt keine wesentliche Einsparung an Rechenzeit [18].

Eine rechentechnisch vorteilhafte Modifikation des obigen Verfahrens ist in [15] angegeben. Anstatt der Transformation (11) auf die Diagonalform wird hier lediglich eine unitäre Ähnlichkeitstransformation (durch den ersten Teil des QR-Algorithmus) auf die Schursche Normalform ausgeführt.

3.2. Verfahren nach [19]

Aus der Anwendung des Newtonschen Verfahrens zur iterativen Lösung von Gl. (7) ergibt sich die Ljapunov-Gleichung

$$\begin{aligned}(\boldsymbol{A} - \boldsymbol{S}\boldsymbol{P}_{k-1})^T\boldsymbol{P}_k + \boldsymbol{P}_k(\boldsymbol{A} - \boldsymbol{S}\boldsymbol{P}_{k-1}) + \\ + \boldsymbol{P}_{k-1}\boldsymbol{S}\boldsymbol{P}_{k-1} + \boldsymbol{Q} = \boldsymbol{0}\end{aligned} \tag{13}$$

für $\boldsymbol{P}_k$ ($k = 1, 2, \ldots$). Bei Vorgabe einer stabilisierenden Startnäherung $\boldsymbol{P}_0$ konvergiert das Verfahren quadratisch und monoton ($\boldsymbol{P}_1 \geqq \boldsymbol{P}_2$ bedeutet $\boldsymbol{x}^T\boldsymbol{P}_1\boldsymbol{x} \geqq \boldsymbol{x}^T\boldsymbol{P}_2\boldsymbol{x}$):

$$\boldsymbol{P}_1 \geqq \boldsymbol{P}_2 \geqq \ldots \geqq \boldsymbol{P}_k \geqq \ldots \geqq \boldsymbol{P}$$

mit

$$\lim_{k\to\infty}\boldsymbol{P}_k = \boldsymbol{P}\,.$$

Das Verfahren setzt effektive Algorithmen zur Lösung von Ljapunov-Gleichungen voraus. Solche sind z. B. die Reihenentwicklung nach [20] und die Anwendung des QR-Algorithmus [21].

Außer den in den Abschn. 3.1. und 3.2. vorgestellten Verfahren sind in der Literatur die verschiedensten Lösungsansätze benutzt worden (z. B. Minimierung mit Verfahren der konjugierten Gradienten [22], Einbettungsprinzipien [23] und [24], Verfahren über die Berechnung der Matrixexponentialfunktion [25] und der Matrix-Signumfunktion [26]).

4. Ausgangsrückführungen

Die numerischen Verfahren zur Bestimmung der Rückführmatrix $\boldsymbol{K}_y$ in Gl. (7) können zunächst grob in drei Gruppen eingeteilt werden:

- Lösung der Optimalitätsbedingungen durch Iterationsverfahren,
- numerische Minimierung des Gütefunktionals $J(\boldsymbol{K}_y)$,
- Approximation einer vorgegebenen ZRF.

4.1. Benutzung der Optimalitätsbedingungen

4.1.1. Notwendige Optimalitätsbedingungen

Im Gegensatz zu dem im Abschn. 3. behandelten Fall ist Gl. (6) in Verbindung mit Gl. (5) wegen $m < n$ als eine weitere, die Struktur des Reglers einschränkende Nebenbedingung für das Optimierungsproblem (2) anzusehen. Die optimale Rückführmatrix $\boldsymbol{K}_y$ wird dabei im Gegensatz zum Fall der ZRF vom Anfangswert $\boldsymbol{x}_0$ abhängen. Da das unerwünscht ist, faßt man

ihn als zufälligen Vektor ξ_0 auf und minimiert den Erwartungswert des Kriteriums (2):

$$\hat{J} = E\{J\} = E\{\xi_0^T P \xi_0\} = \mathrm{Sp}\{PX_0\} \tag{14}$$

mit

$$X_0 := E\{\xi_0 \xi_0^T\} = \hat{X}_0 + \bar{\xi}_0 \bar{\xi}_0^T . \tag{15}$$

Folgende Annahmen über x_0 erscheinen praktikabel:

a) $\bar{\xi}_0 = E\{\xi_0\} = 0$; $X_0 = \hat{X}_0$ ist eine gegebene Kovarianzmatrix;

b) wie a), jedoch speziell $X_0 = \frac{1}{n} I$ (ξ_0 gleichverteilt auf Einheitskugel [28]);

c) $\bar{\xi}_0 \neq 0$, $\hat{X}_0 \neq 0$ gegeben;

d) $\hat{X}_0 = 0$, $\bar{\xi}_0 = x_0$ gegeben (fester Anfangswert).

Als notwendige Optimalitätsbedingung ergibt sich entsprechend [28] bis [31] das nichtlineare Matrizengleichungssystem für K_y, P und L

$$0 = (A + BK_yC)^T P + P(A + BK_yC) + Q + C^T K_y^T R K_y C \tag{16}$$

$$0 = (A + BK_yC) L + L(A + BK_yC)^T + X_0 \tag{17}$$

$$0 = \frac{\partial \hat{J}}{\partial K_y} = (RK_yC + B^T P) L C^T , \tag{18}$$

wobei unter zusätzlichen Voraussetzungen an X_0 [27] P und L positiv definit sind.

4.1.2. Numerische Lösung

Zur Lösung des Gleichungssystems (16) bis (18) werden hier speziell zugeschnittene Iterationsverfahren betrachtet. Diese versuchen, mehr oder weniger die Linearität der Gln. (16) und (17) in P bzw. L bei gegebenem K_y (Ljapunov-Gleichungen) auszunutzen.

Zur günstigeren Darstellung der folgenden Algorithmen wird Gl. (18) nach K_y aufgelöst:

$$K_y = -R^{-1} B^T P L C^T (CLC^T)^{-1} \tag{19}$$

und unter Benutzung von Gl. (8) und der Abkürzung

$$V := LC^T (CLC^T)^{-1} C \tag{20}$$

in die Gln. (16) und (17) eingesetzt:

$$0 = (A - SPV)^T P + P(A - SPV) + Q + V^T P S P V \tag{21}$$

$$0 = (A - SPV) L + L(A - SPV)^T + X_0 . \tag{22}$$

Das älteste Lösungsverfahren ist in [29] sowie in [28] und [11] veröffentlicht:

Schritt 0: Vorgabe einer stabilisierenden Startnäherung K_{y0}:

$$P_0: 0 = (A + BK_{y0}C)^T P_0 + (A + BK_{y0}C) P_0 + Q + C^T K_{y0}^T R K_{y0} C; \qquad k := 1;$$

Schritt 1: Berechnung von L_k und V_k aus dem nichtlinearen Matrizengleichungssystem

$$0 = (A - SP_{k-1}V_k) L_k + L_k (A - SP_{k-1}V_k)^T + X_0 \tag{23}$$

$$V_k = L_k C^T (C L_k C^T)^{-1} C; \tag{24}$$

Schritt 2: Berechnung von P_k aus der Ljapunov-Gleichung

$$0 = (A - SP_{k-1}V_k)^T P_k + P_k (A - SP_{k-1}V_k) + Q + V_k^T P_{k-1} S P_{k-1} V_k; \tag{25}$$

falls $|\mathrm{Sp}\{P_k X_0\} - \mathrm{Sp}\{P_{k-1} X_0\}| < \varepsilon \rightarrow$ STOP;

$k := k + 1$;

weiter in Schritt 1.

Bemerkungen:

- Für die Lösung des Gleichungssystems (23) und (24) wurde in [28] und [29] kein Algorithmus angegeben.
- Falls $A - SP_{k-1}V_k$ ($k = 1, 2, \ldots$) stabil ist (nicht gesichert), gilt

$$\hat{J}(P_k) \leqq \hat{J}(P_{k-1}) \quad (k = 2, 3, \ldots) .$$

- Die Konvergenz des Verfahrens ist nicht gesichert.

In [56] werden anstatt von K_{y0} die Matrizen P_0 und L_0 als Startwerte verwendet, wobei für P_0 die Lösung des Systems mit ZRF (s. Gl. (7)) eingesetzt wird und L_0 sich aus der entsprechenden Gleichung

$$L_0 (A - SP_0)^T + (A - SP_0) L_0 + X_0 = 0$$

ergibt.

Um die Lösung des nichtlinearen Systems (23) und (24) zu umgehen, wurden verschiedene Varianten dazu vorgeschlagen. In [2] werden anstelle der Gln. (23) und (25) die Ljapunov-Gleichungen

$$L_k: 0 = (A - SP_{k-1}V_{k-1}) L_k + L_k (A - SP_{k-1}V_{k-1})^T + X_0$$

$$P_k: 0 = (A - SP_{k-1}V_{k-1})^T P_k + P_k (A - SP_{k-1}V_{k-1}) + Q + V_{k-1}^T P_{k-1} S P_{k-1} V_{k-1} \tag{26}$$

gelöst.

V_{k-1} nach Gl. (24) wird vor der Lösung von Gl. (25) berechnet. Das zum Start erforderliche L_0 ist über K_{y0} in Schritt 0 zu ermitteln. Dieser Algorithmus konvergiert auf jeden Fall schlechter als der zuvor beschriebene; der Rechenaufwand für einen Schritt ist allerdings wesentlich niedriger. In [32] wird ein einfaches Beispiel gezeigt, in dem der Algorithmus nicht konvergiert. Auch hier kann man im Laufe der Iteration in Gebiete instabiler Systemmatrizen ($A - SP_{k-1}V_{k-1}$) gelangen [33] und [34]. Um dies zu vermeiden, wurde in [1] ein automatisch gesteuerter Dämpfungsfaktor $\alpha_k \leqq 1$ so eingeführt, daß anstelle eines instabilen ($A - SP_kV_k$) eine stabile Matrix

$$A - S[P_{k-1}V_{k-1} + \alpha_k (P_kV_k - P_{k-1}V_{k-1})]$$

entsteht. Damit ergaben auch komplizierte Beispiele befriedigende numerische Ergebnisse [34].

In [33] wird von Gl. (21) ausgegangen und aus einem Newtonschen Lösungsansatz die Iterationsvorschrift

$$O = P_k (A - SP_{k-1}) + (A - SP_{k-1})^T P_k + Q + P_{k-1} S P_{k-1} + (I - V_{k-1})^T \times (P_{k-1} S P_k - P_{k-1} S P_{k-1} + P_k S P_{k-1}) (I - V_{k-1}) \tag{27}$$

gewonnen.

Gleichung (27) stellt eine allgemeine lineare Matrizengleichung für P_k dar, die nur durch eine Umformung in ein lineares Gleichungssystem zu lösen wäre. Aus diesem Grund ersetzt [33] vereinfachend im letzten Term von Gl. (27) P_k durch P_{k-1}, so daß eine Ljapunov-Gleichung für P_k entsteht. L_k wird über die Ljapunov-Gleichung

$$0 = L_k (A - SP_k)^T + (A - SP_k) L_k + X_0 + SP_k (I - V_{k-1}) + (I - V_{k-1})^T P_k S$$

berechnet. Auch hier treten bei der Lösung die gleichen Probleme wie bei den vorhergehenden Verfahren auf.

Das Konvergenzverhalten der bisher beschriebenen Algorithmen ist stark von der Startnäherung K_{y0} abhängig. Um dies zu umgehen, wird in [35] und [36] ein Algorithmus angegeben, der eine optimale ZRF schrittweise durch Weglassen jeweils einer „Ausgangsgröße" auf die gesuchte optimale ARF reduziert.

Dazu habe die Matrix C in Gl. (5) die Gestalt

$$C = (I_m \; O_{m,n-m}),$$

die sich durch eine Transformation von Gl. (1) und Gl. (5) immer erreichen läßt. Durch Hinzunahme weiterer Zustandsgrößen als Ausgangsgrößen wird die Matrix C erweitert zu

$$C^j = (I_j \; O_{j,n-j}) \quad (j = m, \ldots, n).$$

Schritt 0: $j := n$;

Berechnung von

- P^n aus Gl. (21) mit $V = I$ (quadratische Matrizengleichung; Lösung s. Abschn. 3.),
- L^n aus der Ljapunov-Gleichung (22);

Schritt 1: $j := j - 1$;

Berechnung einer optimalen ARF (Lösung P^j, L^j) für $C = C^j$ aus den Gln. (20) bis (22) mit einem der Verfahren aus Abschn. 4.1. oder 4.2. Als Startwerte dienen die Lösungen P^{j+1}, L^{j+1} des vorhergehenden Schrittes.

Schritt 2: falls $j = m \rightarrow$ STOP;

sonst weiter in Schritt 1.

Die Gewinnung möglicherweise guter Startwerte wird hier durch die $(n - m + 1)$-malige Berechnung von optimalen ART erkauft.

Zusammenfassend muß eingeschätzt werden, daß der internationale Stand der Iterationsverfahren noch nicht voll befriedigt. Das betrifft insbesondere das mögliche Versagen durch instabil werdende Systemmatrizen, Divergenz und den hohen, von der Güte des Startwertes abhängigen Rechenaufwand.

4.2. *Numerische Minimierung des Gütefunktionals*

Da die numerische Lösung der Optimalitätsbedingungen eine Reihe von Schwierigkeiten bereitet, erscheint die Anwendung von Minimierungsverfahren, für die ausgefeilte Programme (z. B. [37] und [38]) bereits vorliegen, als sinnvolle Alternative. Dieser Weg bietet sich insbesondere auch deshalb an, da für eine gegebene Rückführmatrix K_y der Gütewert $\hat{J}$ gemäß Gl. (15) und die Gradientenmatrix $\partial\hat{J}/\partial K_y$ (Gl. (18)) verhältnismäßig einfach berechnet werden können. Die Verwendung gradientenfreier Minimierungsverfahren hat sich nicht bewährt [39] und wird deshalb nicht weiter verfolgt. Als effektiv hat sich die in [40] und [41] vorgeschlagene Anwendung der Methode der konjugierten Richtungen (Algorithmus von *Davidon-Fletcher-Powell* [42]) erwiesen [43], die in folgenden Schritten abläuft)[2]:

Schritt 0: Vorgabe einer stabilisierenden Startnäherung

$$K_{y0}: \; z_0 := \mathrm{col}\,\{K_{y0}\}$$

$$k := 0; \; j := 0;$$

Schritt 1: $G_k := A + BK_{yk}C$

$$P_k : 0 = G_k^T P_k + P_k G_k + Q + C^T K_{yk}^T R K_{yk} C \quad (28)$$

$$L_k : 0 = G_k L_k + L_k G_k^T + X_0 \quad (29)$$

$$g_k := \mathrm{col}\,\{(RK_{yk}C + B^T P_k) L_k C\}$$

falls $\|g_k\| < \varepsilon \rightarrow$ STOP

Schritt 2: falls $j = 0$: $H_k := I$,

sonst:

$$H_k := H_{k-1} + \frac{(z_k - z_{k-1})(z_k - z_{k-1})^T}{(z_k - z_{k-1})^T (g_k - g_{k-1})} - \frac{H_{k-1}(g_k - g_{k-1})(g_k - g_{k-1})^T H_{k-1}}{(g_k - g_{k-1})^T H_{k-1}(g_k - g_{k-1})}$$

$$s_k := -H_k g_k;$$

Schritt 3: eindimensionale Minimierung unter Benutzung der Gln. (14) und (28)

$$\hat{J}(z_k + \alpha_k s_k) := \min_{\alpha \geqq 0} \hat{J}(z_k + \alpha s_k); \quad (30)$$

$$z_{k+1} := z_k + \alpha_k s_k;$$

$$k := k + 1;$$

falls $j = 2 \cdot \dim z$, setze $j := 0$,

sonst $j := j + 1$;

$$K_{yk} = \mathrm{col}^{-1}\{z_k\};$$

weiter in Schritt 1.

Bemerkungen:

- Zusätzlich ist in jedem Schritt k ein Stabilitätstest über eine Cholesky-Zerlegung von P_k auszuführen.
- Der wesentliche numerische Aufwand besteht in der Lösung der Ljapunov-Gln. (28) und (29) sowie in Gl. (30) (s. dazu auch Abschn. 3.2.).

Auf weitere aus der Literatur bekannt gewordene Anwendungen von Minimierungsverfahren zur Lösung dieses Problems sei hier nur verwiesen:

- *Davison* und *Rau* [44] verwenden das Verfahren von *Rosenbrock*.
- *Konopa* [45] setzt ein gradientenähnliches Verfahren mit Schrittweitenberechnung nach *Armijo* [42] ein.
- *Geromel* und *Bernussou* schlagen ein für den Entwurf dezentraler Regelungen geeignetes Verfahren vor [46] und [47]. Sie setzen K_y als Blockdiagonalmatrix an und berechnen jeweils die zugehörige Gradientenmatrix. Um während der Suche im zulässigen Gebiet zu bleiben, werden die Elemente der Gradientenmatrix außerhalb der Diagonalblöcke Null gesetzt. Dieses Vorgehen entspricht dem Verfahren der zulässigen Richtungen [48].

Die Minimierungsverfahren sind dann vorteilhaft einsetzbar, wenn die Anzahl $m \cdot r$ der zu bestimmenden Elemente von K_y vergleichsweise klein ist. Umgekehrt sind die iterativen Verfahren vorzuziehen, da dort die Matrixgestalt der Gleichungen erhalten bleibt und die Algorithmen dadurch effektiver werden.

4.3. *Approximation von Zustandsrückführungen*

Die in diesem Abschnitt behandelten Verfahren setzen voraus, daß für das System (1) eine ZRF (4) vorliegt. Gesucht ist hier eine ARF (6), die die Eigenwerte des zustandsrückgeführten Systems möglichst gut approximiert (andere Approximationskriterien s. [49]). Grundlage der Verfahren ist der folgende in [50] bewiesene Satz:

Es sei $\Lambda_1 = \{\lambda_1, \ldots, \lambda_l\}$ $(l \leqq n)$ eine Menge zur reellen Achse symmetrischer Eigenwerte von $A + BK$ und M_1 eine reelle Basismatrix des zu Λ_1 gehörigen Eigenraums. Gilt

$$K_y C M_1 = K M_1, \quad (31)$$

so ist Λ_1 auch eine Menge von Eigenwerten für

$$A + BK_yC$$

(des mit ARF geschlossenen Systems).

Medanić [51] und [52] behält so viele Eigenwerte bei, wie Ausgänge y zur Verfügung stehen, also $l = m$. Bei nicht-singulärem

[2]) Durch das Symbol col $\{\cdot\}$ wird die Einordnung der Spalten einer Matrix in einen Spaltenvektor und durch $\mathrm{col}^{-1}\{\cdot\}$ die umgekehrte Operation bezeichnet.

Produkt CM_m erfüllt

$$K_y = KM_m(CM_m)^{-1} \tag{32}$$

die Beziehung (31). Die restlichen $n - m$ Eigenwerte sind undefiniert verschoben.

Bengtsson und *Lindahl* lösen Gl. (31) für $l > m$ approximativ und nehmen an, daß dann das System mit ARF auch angenähert die gleichen Eigenwerte wie das mit ZRF hat. Die Lösung

$$K_y = KM_1W(CM_1W)^+ \tag{33}$$

minimiert die Norm des Defekts von Gl. (31)

$$||(K_yC - K)M_1W||$$

mit W als zusätzlich eingeführter Wichtungsmatrix. Die Matrix $(\cdot)^+$ ist die Pseudoinverse [53] zu $(\cdot)$. W wird meist als Diagonalmatrix gewählt und beeinflußt die Approximationsgüte der einzelnen Eigenwerte.

Die Vorteile der Verfahren liegen im einfachen Algorithmus und in der problemlosen Erweiterbarkeit auf Aufgaben der dezentralen Regelung. Nachteilig ist, daß Stabilität und gutes dynamisches Verhalten nicht a priori gesichert sind. Beim Verfahren von *Bengtsson* und *Lindahl* besteht weiterhin die Möglichkeit, über die Wichtungsmatrix W die Entwurfsergebnisse zu beeinflussen, was allerdings durch Probieren (im Dialog mit dem Rechner) geschehen muß.

5. Programmpaket zum Reglerentwurf [1]

Aufbauend auf den vorstehend beschriebenen Verfahren gestattet das Programmpaket die Berechnung

- optimaler Zustandsrückführungen
- zentraler und dezentraler Ausgangsrückführungen
- des Eingangs-Ausgangsverhaltens (Simulation)
- der Frequenzgänge
- von Eigenwerten und Eigenvektoren von Matrizen
- der Lösung von Ljapunov-Gleichungen.

Die Programme wurden für die Rechenanlage BESM-6 vorwiegend in den Sprachen ALGOL und FORTRAN geschrieben. Sie wurden bei umfangreichen industriellen Aufgaben (bis zu 32 Zustandsgrößen) erfolgreich eingesetzt [34] [39] und [56].

Literatur

[1] *Martin, K.; Küßner, K.; Haak, B.; Haufe, B.:* Programmdokumentation zum Programmpaket „Entwurf zentraler und dezentraler Regelungen für umfangreiche dynamische Systeme im Zustandsraum". AdW-ZKI, 1980 (unveröffentlichtes Arbeitsmaterial).

[2] *Anderson, B. D. O.; Moore, J. B.:* Linear Optimal Control. London: Prentice-Hall 1971.

[3] *Kwakernaak, H.; Sivan, R.:* Linear Optimal Control Systems. New York: Wiley-Interscience 1972.

[4] *Fallside, F.:* Control System Design by Pole-Zero Assignment. London: Academic Press 1977.

[5] *Kalman, R. E.:* Contributions to the theory of optimal control. Bol. Soc. Mat. Mex. **5** (1960) pp. 102—119.

[6] *Letov, A. M.:* Analiticeskoe konstruirovanie reguljatorov (Analytischer Entwurf von Reglern). Avt. i Telem. **21** (1960) No. 4, pp. 436—441.

[7] *Weihrich, G.:* Optimale Regelung linearer deterministischer Prozesse. München/Wien: R. Oldenbourg Verlag 1973.

[8] *Luenberger, D. G.:* Observing the state of a linear system. IEEE Trans. on Military Electronics, **MIL-8** (1964) pp. 74—80.

[9] *Pearson, J.; Ding, C.:* Compensator design for multivariable linear systems. IEEE Trans. Aut. Control **AC-14** (1969) pp. 130—134.

[10] *Rybak, J.; Korn, U.:* Zur Anwendung des Prinzips der dynamischen Kompensation auf aperiodisch gestörte Mehrgrößensysteme. msr **19** (1976) H. 5, S. 171—174.

[11] *Johnson, T. L.; Athans, M.:* On the design of optimal constrained dynamic compensators for linear constant systems. IEEE Trans. Aut. Control, **AC-15** (1970) pp. 658—660.

[12] *Johnson, C. D.:* Accomodation of disturbances in optimal control problems. Int. J. Control **15** (1972) pp. 209—231.

[13] *Smith, H. W.; Davison, E. J.:* Design of industrial regulators: integral feedback and feedforward control. Proc. IEE **119** (1972) pp. 1210—1216.

[14] *von Escherich, G.:* Die zweite Variation der einfachen Integrale. Wiener Sitzungsberichte **8** (1898) S. 1191—1250.

[15] *Laub, A. J.:* A Schur Method for Solving Algebraic Riccati Equations. IEEE Trans. Aut. Control, **AC-24** (1979) pp. 913—921.

[16] *Potter, I. E.:* Matrix quadratic solutions. SIAM J. Appl. Math. **14** (1966) pp. 496—501.

[17] *Wilkinson, J. H.; Reinsch, C.:* Handbook for Automatic Computation. Vol. II: Linear Algebra. Westberlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1971.

[18] *Eibisch, H.-F.:* Erprobung einer simultanen Eigenwertverschiebung für eine speziell aufgebaute Matrix. Diplomarbeit, TU Dresden 1978.

[19] *Kleinman, D. L.:* On an iterative technique for Riccati equation computations. IEEE Trans. Aut. Control, **AC-13** (1968) pp. 114 and 115.

[20] *Smith, R. A.:* Matrix equation $XA + BX = C$. SIAM J. Appl. Math. **16** (1968) pp. 198—201.

[21] *Bartels, R. H.; Stewart, G. W.:* A solution of the equation $AX + XB = C$. Commun. ACM **15** (1972) pp. 820—826.

[22] *Man, F. T.:* The Davidon method of solution of the algebraic matrix Riccati equation. Int. J. Control **10** (1969) pp. 713—719.

[23] *Jamshidi, M.; Böttiger, F.:* On the imbedded solutions of algebraic matrix Riccati equation. JACC (1976) pp. 474—481.

[24] *Datta, K. P.:* Series solution of matrix Riccati equation. Int. J. Control **27** (1978) pp. 463—472.

[25] *Vaughan, D. R.:* A negative exponential solution for the matrix Riccati equation. IEEE Trans. Aut. Control, **AC-14** (1969) pp. 72—75.

[26] *Balzer, L. A.:* Accelerated convergence of the matrix sign function method of solving Ljapunov, Riccati and other matrix equations. Int. J. Control **32** (1980) pp. 1057—1078.

[27] *Müller, P. C.:* Stabilität und Matrizen. Westberlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1977.

[28] *Levine, W. S.; Athans, M.:* On the determination of the optimal constant output feedback gains for linear multivariable systems. IEEE Trans. Aut. Control, **AC-15** (1970) pp. 44—48.

[29] *Axsäter, S.:* Suboptimal time-variable feedback control of linear dynamic systems with random inputs. Int. J. Control **4** (1966) pp. 549—566.

[30] *Mendel, J. M.:* A concise derivation for optimal constant limited state feedback gains. IEEE Trans. Aut. Control, **AC-19** (1974) pp. 447 and 448.

[31] *Hutcheson, W. J.:* A simple derivation of the gradient conditions for optimal constant output feedback gains. IEEE Trans. Aut. Control, **AC-23** (1978) pp. 937 and 938.

[32] *Söderstrom, T.:* On some algorithms for design of optimal constrained regulators. IEEE Trans. Aut Control, **AC-23** (1978) pp. 1100 and 1101.

[33] *Naeije, W. J.; Valk, P.; Bosgra, O. H.:* Design of optimal incomplete state feedback controllers for large linear constant systems. Proc. 5. IFIP-Conf. on Optimization Techniques, Rom 1973, pp. 375—382.

[34] *Küßner, K.; Martin, K.:* Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von Zustandsraumverfahren zum Entwurf von Mehrgrößenregelungen am Modell eines 210-MW-Kraftwerksblockes. Forschungsbericht, AdW-ZKI, 1979.

[35] *Čalovic, M. S.; Ćuk, N. M.; Bingulac, S. P.:* The compensation of immeasurable disturbances via optimum output feedback. Int. J. Contr. **19** (1974) pp. 1005—1020.

[36] *Čalovic, M. S.; Bingulac, S. P.; Ćuk, N. M.:* Ein selbsttätiger PI-Regler für automatische Frequenz-Leistungs-Regelung. Regelungstechnik **23** (1975) S. 186—196.

[37] *Uhlig, J.:* Programmpaket MINPA zur statischen Optimierung von Teilsystemen. Forschungsbericht, AdW-ZKI, 1974.

[38] *Haak, B.:* Programmpaket OPTPA zur statischen Optimierung von Teilsystemen. Forschungsbericht. AdW-ZKI, 1975.

[39] *Martin, K.; Küßner, K.; Haufe, B.:* Erfahrungen beim Entwurf von zentralen Regelungen für umfangreiche Systeme. Vortrag 24. Int. Wiss. Kolloquium TH Ilmenau, 1979.

[40] *Horisberger, H. P.; Belanger, P. R.:* Solution of the optimal constant output feedback problem by conjugate gradients. IEEE Trans. Aut. Control, **AC-19** (1974) pp. 434 and 435.

[41] *Choi, S. S.; Sirisena, H. S.:* Computation of optimal output feedback gains for linear multivariable systems. IEEE Trans. Aut. Control, **AC-19** (1974) pp. 257 and 258.

[42] *Schwetlick, H.:* Numerische Lösung nichtlinearer Gleichungen. Berlin: VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften 1979.

[43] *Schlegel, H.-U.:* Entwurf von proportionalen Ausgangsrückführungen für lineare zeitinvariante Mehrgrößensysteme. Diplomarbeit, TU Dresden 1981.

[44] *Davison, E. J.; Rau, N. S.:* The optimal output feedback of a synchronous machine. IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, **PAS-90** (1971) pp. 2123—2134.

[45] *Konopa, V.:* Přima metoda výpočtu optimálniho rizeni lineárni stacionárni soustavy s neúplnou informaci o stavu. Automatizace **20** (1977) S. 179—181.

[46] *Geromel, J. C.; Bernussou, J.:* An algorithm for optimal decentralized regulation of linear quadratic interconnected systems. Automatica **15** (1979) pp. 489—491.

[47] *Geromel, J. C.; Bernussou, J.:* Optimal decentralized control problem — application to electrical power networks. 2-nd IFAC/IFORS-Symposium on Optimization Methods — Applied Aspects, Varna, 1979.

[48] *Großmann, Ch.; Kleinmichel, H.:* Verfahren der nichtlinearen Optimierung. Leipzig: BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft 1976.

[49] *Lunze, J.:* Übersicht über die Verfahren zum Entwurf dezentraler Regler für lineare zeitinvariante Systeme. msr **23** (1980) H. 6, S. 315—322.

[50] *Bengtsson, G.; Lindahl, S.:* A design scheme for incomplete state or output feedback with applications to boiler and power system control. Automatica **10** (1974) pp. 15—30.

[51] *Medanič, J.:* On stabilization and optimization by output feedback. XII-th Annual Asilomar Conference on Circuits and Systems, Pacific Grove, 1978.

[52] *Medanič, J.:* Dezentralized control of linear systems with respect to quadratic criteria. 2-nd IFAC/IFORS Symposium on Optimization Methode — Applied Aspects. Varna ,1979.

[53] *Boullion, T. L.; Odell, P. L.:* Generalized inverse matrices. New York: Wiley-Interscience 1971.

[54] *Shih, Y.-P.; Chen, C.-J.:* On the weighting factors of the quadratic criterion in optimal control. Int. J. Contr. **19** (1974) pp. 947—955.

[55] *Röder, H.-W.; Rösel, G.-S.:* Entwurf optimaler Regelungen für Dampferzeuger mit Hilfe einer Strategie zur Festlegung der Bewertungsmatrizen. msr **22** (1979) H. 4, S. 207—212.

[56] *Petkovski, D. J.; Rakić, M.:* On the calculation of optimum feedback gains for output-constraines regulatored. IEEE Trans. Aut. Contr., **AC-23** (1978) pp. 760.

[57] *Müller, D.; Küßner, K.:* Zur Ausregelung von Torsionsschwingungen an einer Rotationsdruckmaschine (in Vorbereitung).

msr 7527

Doz. Dr.-Ing. *H. Zietz*, Wismar[1])

Vorschlag für eine allgemeine Koppelfunktion der Mehrgrößenstrecke und der Mehrgrößenregelung und Darstellung ihrer Eigenschaften am Beispiel der Dreigrößenregelung

IA 2.3.1.7.

0. Einleitung

Mehrgrößensysteme sind gekoppelte Systeme. Daher hat die Charakterisierung der Art und Stärke der Kopplung wesentliche Bedeutung für die Einschätzung von Mehrgrößensystemen. Bei der Zweigrößenregelung hat sich der charakteristische Koppelfaktor $C(p) = S_{12}S_{21}/S_{11}S_{22}$ [1], der Ausdruck der Kopplung der Zweigrößenstrecke ist, allgemein als Kriterium zur Charakterisierung der Kopplung durchgesetzt. Es lag daher nahe, nach einem allgemeinen Koppelfaktor für Mehrgrößensysteme mit mehr als zwei Regelgrößen zu suchen.

Von *Rosenbrock* [12] und [14] wurde ein allgemeines Kriterium für Diagonaldominanz von Mehrgrößensystemen angegeben, bei dem die Summe der absoluten Beträge der Koppelelemente S_{ik} $(i \neq k)$ jeder Zeile bzw. Spalte zum Betrag ihres Hauptdiagonalelements S_{ii} ins Verhältnis gesetzt wird. Dieses Kriterium hat sich zum Nachweis der Diagonaldominanz von Mehrgrößensystemen als Grundlage für einen vereinfachten Reglerentwurf bewährt. Für eine umfassende Charakterisierung der Kopplung, wie es der Koppelfaktor für die Zweigrößenstrecke leistet, reicht dieses Kriterium nicht aus.

Ein erster Ansatz für einen allgemeinen Koppelfaktor für Mehrgrößensysteme wurde in [8] und [9] gegeben. Nachteilig ist, daß dieser Koppelfaktor von den Reglern abhängig ist. Bei der Suche nach einem Frequenzgangkriterium zur Abschätzung kopplungsbedingter Einschränkungen für die Regelung von Zweigrößenstrecken stellte sich heraus, daß ein Zusammenhang, der zwischen dem Koppelfaktor $C(p)$ und der Determinante der Übertragungsmatrix der Zweigrößenstrecke besteht, allgemeiner Natur ist und zur Definition einer allgemeinen Koppelfunktion des Mehrgrößensystems herangezogen werden kann. Auf dieser Grundlage wird eine allgemeine Koppelfunktion der Mehrgrößenstrecke, ein einfaches Kriterium für Allpaßverhalten von Mehrgrößenstrecken mit Phasenminimumelementen und eine allgemeine Koppelfunktion der Mehrgrößenregelung eingeführt und am Beispiel der Dreigrößenregelung erläutert.

1. Ableitung der allgemeinen Koppelfunktion der Mehrgrößenstrecke und Mehrgrößenregelung

1.1. *Allgemeine Koppelfunktion der Mehrgrößenstrecke*

Ein Mehrgrößensystem ist dadurch gekennzeichnet, daß es mehrere Eingangs- und Ausgangsgrößen besitzt und jede Ausgangsgröße von mehr als einer Eingangsgröße gesteuert wird, worin die Kopplung im System zum Ausdruck kommt. Dementsprechend sind die Übertragungsmatrizen von Mehrgrößensystemen nicht diagonal. Die Nullstellen und Pole einer quadratischen Übertragungsmatrix $\boldsymbol{S}$ sind durch ihre Determinante gemäß Gl. (1) bestimmt. Dabei stellt $H(p)$ den Hauptnenner — das kleinste gemeinsame Vielfache aller Nennerpolynome — und $N(p)$ das Nullstellenpolynom der Übertragungsmatrix dar, das sich aus der Determinante der mit dem Hauptnenner erweiterten Übertragungsmatrix als Polynommatrix gemäß Gl. (2) ergibt. $H(p)$ und $N(p)$ können über die MacMillan-Normalform der Übertragungsmatrix eindeutig bestimmt werden [2].

$$\det \boldsymbol{S} = K \frac{N(p)}{H(p)} \qquad K = \text{Konst} \tag{1}$$

$$N(p) = K \det \left(H(p) \cdot \boldsymbol{S}\right). \tag{2}$$

Bei Diagonalmatrizen besteht die Determinante nur aus dem Produkt der Hauptdiagonalelemente gemäß Gl. (3)

$$\det \boldsymbol{S} = \prod_{i=1}^{m} S_{ii}, \tag{3}$$

und die Eigenwerte des Mehrgrößensystems sind mit den Eigenwerten der Hauptdiagonalelemente identisch. Das Mehrgrößensystem zerfällt in diesem Fall bekanntlich in die entsprechende Anzahl autonomer Systeme, für die der Reglerentwurf auf der Grundlage der Theorie der Regelung einer Regelgröße einfach durchgeführt werden kann.

Echte Mehrgrößensysteme sind nur solche Systeme, bei denen die Eigenwerte des Systems nicht mit denen der Hauptdiagonalelemente übereinstimmen und die Determinante des Mehrgrößensystems dementsprechend außer dem Produkt der Hauptdiagonalelemente mindestens noch ein weiteres Produkt enthält (vgl. Gl. (4)). Wenn man von der Determinante einer Matrix das Hauptdiagonalprodukt abzieht, bleiben nur die Produkte übrig, die Ausdruck für echte Mehrgrößensysteme sind. Wenn man diese restlichen Produkte auf das Produkt der Hauptdiagonalelemente bezieht, erhält man eine normierte Koppelfunktion, die angibt, ob ein echtes Mehrgrößensystem vorliegt und in welchem Maße es von der Diagonalform abweicht.

$$\det \boldsymbol{S} = \det \begin{bmatrix} S_{11}S_{12} \\ S_{21}S_{22} \end{bmatrix} = S_{11}\,S_{22} - S_{12}\,S_{21}. \tag{4}$$

Die Anwendung dieser Vorschrift auf die Übertragungsmatrix der Zweigrößenstrecke gemäß Gl. (4) führt auf den bekannten charakteristischen Koppelfaktor $C(p)$ gemäß Gl. (5), den *Schwarz* bei der Analyse entkoppelter Zweigrößenregelungen einführte [1], und der sowohl bei der entkoppelten als auch bei der nichtentkoppelten Zweigrößenregelung wesentliche Bedeutung hat [1] bis [9].

$$\frac{\det \boldsymbol{S} - S_{11}S_{22}}{S_{11}S_{22}} = -\frac{S_{12}S_{21}}{S_{11}S_{22}} = -C(p). \tag{5}$$

Durch Einführung des Koppelfaktors $C(p)$ läßt sich die Determinante der Übertragungsmatrix der Zweigrößenstrecke gemäß Gl. (6) darstellen

$$\det \boldsymbol{S} = \left(1 - C(p)\right) S_{11}S_{22}. \tag{6}$$

Nach Gl. (6) zerfällt die Zweigrößenstrecke bekanntlich in die autonomen Hauptstrecken S_{11} und S_{22}, wenn $C(p) = 0$. Die Determinante wird Null, d. h. die Zweigrößenstrecke ist singulär, wenn $C(p) = 1$. In diesem Fall ist die Zweigrößenstrecke nicht vollständig ausgangssteuerbar, d. h., eine der beiden Regelgrößen ist nicht unabhängig von der anderen zu steuern. Ein Beispiel ist in [6] analysiert.

Für Mehrgrößenstrecken spielt das Allpaßverhalten eine größere Rolle als für Systeme mit einer Eingangs- und Ausgangsgröße. Andererseits ist das Allpaßverhalten von Mehrgrößenstrecken

[1]) Mitteilung aus der IH Wismar, Sektion Elektrotechnik/Elektronik.

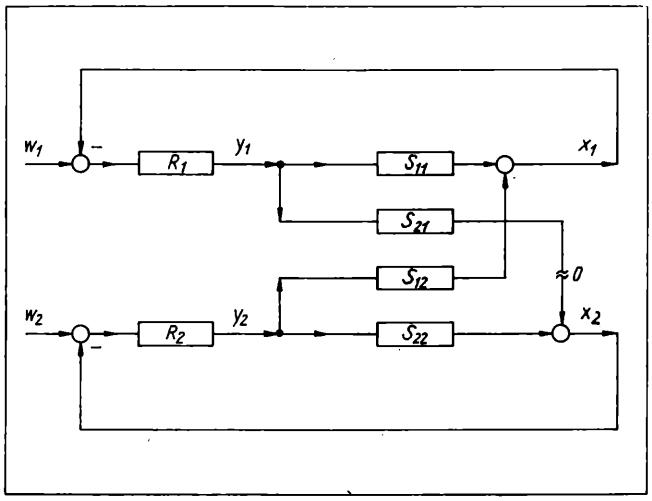


Bild 1. Signalflußbild der nichtentkoppelten Zweigrößenregelung

schwieriger zu erkennen, da es nicht durch die Zählerpolynome der Elemente, sondern durch die Determinante der Übertragungsmatrix gemäß Gl. (1) und (2) bestimmt ist. Mit Hilfe der Koppelfunktion $C(p)$ ist kopplungsbedingtes Allpaßverhalten der Zweigrößenstrecke zu erkennen [10]. Aus Gl. (6) folgt in Verbindung mit Gl. (1), daß die Determinante der Übertragungsmatrix positive Nullstellen hat, wenn entweder eine oder beide Hauptstrecken und/oder der Klammerausdruck positive Nullstellen haben. Wenn die Hauptstrecken Phasenminimumsysteme sind, kann Allpaßverhalten nur auftreten, wenn der Klammerausdruck in Gl. (6) positive Nullstellen aufweist. Zum Nachweis der positiven Nullstellen des Klammerausdrucks wird die negierte Koppelfunktion $C_n(p)$ gemäß Gl. (7) definiert

$$C_n(p) = -C(p) \tag{7}$$

und in die Gl. (6) eingeführt, so daß sich Gl. (8) ergibt

$$\det \boldsymbol{S} = \left(1 + C_n(p)\right) S_{11} S_{22} . \tag{8}$$

Nach dieser Umformung kann eine einfache Bedingung für positive Nullstellen des Klammerausdrucks angegeben werden. Betrachtet man $C_n(p)$ als Übertragungsfunktion eines aufgeschnittenen einschleifigen Regelkreises, so enthält der Klammerausdruck positive Nullstellen, wenn die Ortskurve der negierten Koppelfunktion $C_n(j\omega)$ das allgemeine Nyquist-Kriterium [11] und [12] nicht erfüllt. Wenn alle Elemente der Übertragungsmatrix stabile Phasenminimumsysteme sind — dieser Fall ist in der Literatur am häufigsten anzutreffen — tritt kopplungsbedingtes Allpaßverhalten der Zweigrößenstrecke auf, wenn die Ortskurve der negierten Koppelfunktion $C_n(j\omega)$ den kritischen Punkt $(-1, j0)$ umfaßt. Damit ist ein einfaches Kriterium zum Erkennen von Allpaßverhalten von Mehrgrößenstrecken gegeben, denn dieser Sachverhalt gilt ohne Einschränkungen auch für Mehrgrößenstrecken mit mehr als zwei Stell- und Regelgrößen [10] und [13], wenn man sich auf die allgemeine charakteristische Koppelfunktion der Mehrgrößenstrecke $C_n(p)$ gemäß Gl. (9) bezieht, die aus Gl. (4) unter Berücksichtigung von Gl. (7) abgeleitet ist.

$$C_n(p) = \frac{\det \boldsymbol{S}}{\prod_{i=1}^{m} S_{ii}} - 1 . \tag{9}$$

Da bei Mehrgrößenstrecken mit stabilen Phasenminimumelementen Allpaßverhalten nur auftritt, wenn die Ortskuve $C_n(j\omega)$ den kritischen Punkt $(-1, j0)$ umfaßt, kann man für diese Klasse von Mehrgrößenstrecken generell Allpaßverhalten ausschließen, wenn der Betrag der Streckenkopplung $C_n(p)$ unter dem Wert 1 bleibt.

Bei Allpaßverhalten der Mehrgrößenstrecke ist mindestens eine Regelgröße in der Güte der Regelung allpaßbedingt begrenzt. Für Mehrgrößenstrecken mit stabilen Phasenminimumelementen markiert die Schnittfrequenz des Amplitudenganges von $C_n(p)$ mit der 0-dB-Linie in erster Näherung die Grenze für die Schnelligkeit der Regelung [10].

1.2. Koppelfunktion der Mehrgrößenregelung

Die Grundlage der Stabilitätsanalyse von Mehrgrößenregelungen im Frequenzbereich bildet die Determinante der Rückführdifferenzmatrix gemäß Gl. (10) [14] [15] [17] und [18].

$$\det (\boldsymbol{I} + \boldsymbol{F}_0) = \frac{\text{charakt. Polynom des geschlossenen Systems}}{\text{charakt. Polynom des offenen Systems}} \tag{10}$$

Für die Zweigrößenregelung mit diagonaler Reglermatrix gemäß Bild 1 ergibt sich die Determinante der Rückführdifferenzmatrix gemäß Gl. (11).

$$\det (\boldsymbol{I} + \boldsymbol{F}_0) = (1 + S_{11}R_1)(1 + S_{22}R_2) - S_{12}S_{21}R_1R_2 = 0. \tag{11}$$

Wenn man das Hauptdiagonalprodukt in Gl. (11) ausklammert, wobei stabile einschleifige Kreise vorausgesetzt werden, erhält man Gl. (12).

$$\det (\boldsymbol{I} + \boldsymbol{F}_0) = (1 + S_{11}R_1)(1 + S_{22}R_2) \times$$
$$\times \left[1 - \frac{S_{12}S_{21}}{S_{11}S_{22}} \frac{S_{11}R_1}{(1 + S_{11}R_1)} \frac{S_{22}R_2}{(1 + S_{22}R_2)}\right] = 0 . \tag{12}$$

Der letzte Klammerausdruck in Gl. (12) kann als charakteristische Gleichung eines skalaren Ersatzregelkreises gemäß Gl. (13) mit der Übertragungsfunktion F_{00}^* des offenen Systems gemäß Gl. (14) gedeutet werden [2] [3] und [6]:

$$1 - F_{00}^* = 0 \tag{13}$$

$$F_{00}^* = C(p)\, F_{w1} F_{w2} . \tag{14}$$

F_{00}^* ergibt sich aus dem Signalflußbild, wenn man die Zweigrößenregelung an der Stelle 0 aufschneidet. In diesem Ersatzregelkreis liegt eine gerade Anzahl von Vorzeichenumkehrstellen vor (von den einschleifigen Kreisen), so daß nach der Struktur Mitkopplung vorliegt, was u. a. in dem negativen Vorzeichen in Gl. (12) und Gl. (13) zum Ausdruck kommt. Um diesen Ersatzregelkreis strukturell auf die Gegenkopplung umzustellen, wird durch die Einführung der negierten Koppelfunktion $C_n(p)$ gemäß Gl. (7) eine Vorzeichenumkehr gemäß Gl. (15) und Gl. (16)

$$F_{00} = C_n F_{w1} F_{w2} = -F_{00}^* \tag{15}$$

$$1 + F_{00} = 0 \tag{16}$$

vorgenommen, so daß der kritische Punkt für das neue Ersatzsystem F_{00} generell bei $(-1, j0)$ liegt, was dem Regelungstechniker vom einschleifigen Kreis her geläufig ist. Wenn man Gl. (15) in Gl. (12) einführt, erhält man Gl. (17).

$$\det (\boldsymbol{I} + \boldsymbol{F}_0) = (1 + S_{11}R_1)(1 + S_{22}R_2)(1 + F_{00}) . \tag{17}$$

Stabile einschleifige Kreise vorausgesetzt, ist das gekoppelte System stabil, wenn die Ortskurve $F_{00}(j\omega)$ das Nyquist-Kriterium erfüllt. Wenn alle Elemente der Übertragungsmatrix der Strecke Pole und Nullstellen mit negativem Realteil haben, darf die Ortskurve $F_{00}(j\omega)$ den kritischen Punkt $(-1, j0)$ nicht umfassen. F_{00} erfaßt gemäß Gl. (17) die kopplungsbedingten Einschränkungen für die Stabilität der nichtentkoppelten Zweigrößenregelung und ist aufgrund seiner Struktur gemäß Gl. (15) mit $C_n(p)$ als Faktor besonders geeignet, den Einfluß der Streckenkopplung auf die Stabilität des gekoppelten Regelungssystems zu analysieren [6] und [10].

Aus Gl. (17) läßt sich analog zu der allgemeinen Koppelfunktion der Mehrgrößenstrecke gemäß Gl. (9) eine allgemeine Koppel-

funktion der Mehrgrößenregelung $F_{00}(p)$ gemäß Gl. (18) ableiten.

$$F_{00}(p) = \frac{\det(\boldsymbol{I} + \boldsymbol{F}_0)}{\prod_{i=1}^{m}(1 + F_{0i})} - 1 \tag{18}$$

$$F_{0i} = S_{ii}R_i \tag{19}$$

Gleichung (18) ist nicht auf die Mehrgrößenregelung mit diagonaler Reglermatrix beschränkt, sondern auch auf die Mehrgrößenregelung mit nicht diagonaler Reglermatrix anwendbar, z. B. um den Einfluß von näherungsweiser Entkopplung auf die Stabilität zu überprüfen. Durch Umformung von Gl. (18) erhält man Gl. (20) als Verallgemeinerung von Gl. (17), die die Bedeutung der Koppelfunktion $F_{00}(p)$ für die Stabilität der Mehrgrößenregelung unterstreicht.

$$\det(\boldsymbol{I} + \boldsymbol{F}_0) = (1 + F_{00}(p)) \prod_{i=1}^{m}(1 + F_{0i}) . \tag{20}$$

Zur Ableitung der Formeln für $C_n(p)$ und $F_{00}(p)$ wurde vom Zweigrößensystem ausgegangen und auf den allgemeinen Fall geschlossen.

Für die Darlegung der Eigenschaften von $C_n(p)$ und $F_{00}(p)$ und ihrer Beziehungen untereinander ist der Übergang zum Dreigrößensystem notwendig, da beim Zweigrößensystem die typischen Koppelverhältnisse der Mehrgrößensysteme noch nicht genügend ausgeprägt sind.

2. Koppelfunktion der Dreigrößenstrecke und der nichtentkoppelten Dreigrößenregelung und ihre Beziehungen untereinander

Für die Dreigrößenstrecke in P-kanonischer Struktur gemäß Gl. (21) wird die Koppelfunktion $C_n(p)$ nach dem allgemeinen Ansatz gemäß Gl. (9) bestimmt, indem von der Determinante der Übertragungsmatrix der Strecke das Produkt der Hauptdiagonalelemente abgezogen und der Rest durch das Hauptdiagonalprodukt dividiert wird.

$$\boldsymbol{S} = \begin{bmatrix} S_{11}S_{12}S_{13} \\ S_{21}S_{22}S_{23} \\ S_{31}S_{32}S_{33} \end{bmatrix}, \tag{21}$$

$$\begin{aligned}\det \boldsymbol{S} = {} & S_{11}S_{22}S_{33} + S_{12}S_{23}S_{31} + S_{13}S_{21}S_{32} - \\ & - S_{31}S_{22}S_{13} - S_{32}S_{23}S_{11} - S_{33}S_{21}S_{12}\end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}C_n(p) = {} & \frac{\det \boldsymbol{S}}{S_{11}S_{22}S_{33}} - 1 = \frac{S_{12}S_{23}S_{31}}{S_{11}S_{22}S_{33}} + \frac{S_{13}S_{32}S_{21}}{S_{11}S_{22}S_{33}} - \\ & - \frac{S_{12}S_{21}}{S_{11}S_{22}} - \frac{S_{13}S_{31}}{S_{11}S_{33}} - \frac{S_{23}S_{32}}{S_{22}S_{33}} .\end{aligned} \tag{23}$$

Die Koppelfunktion der nichtentkoppelten Regelung wird analog ermittelt. Zunächst wird die Rückführdifferenzmatrix (Gl. (26)) berechnet.

$$\boldsymbol{R} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & 0 \\ 0 & R_2 & 0 \\ 0 & 0 & R_3 \end{bmatrix} \tag{24}$$

$$\boldsymbol{F}_0 = \boldsymbol{SR} = \begin{bmatrix} S_{11}R_1 & S_{12}R_2 & S_{13}R_3 \\ S_{21}R_1 & S_{22}R_2 & S_{23}R_3 \\ S_{31}R_1 & S_{32}R_2 & S_{33}R_3 \end{bmatrix}, \tag{25}$$

$$(\boldsymbol{I} + \boldsymbol{F}_0) = \begin{bmatrix} 1 + S_{11}R_1 & S_{12}R_2 & S_{13}R_3 \\ S_{21}R_1 & 1 + S_{22}R_2 & S_{23}R_3 \\ S_{31}R_1 & S_{32}R_2 & 1 + S_{33}R_3 \end{bmatrix} . \tag{26}$$

Aus der Determinante der Rückführdifferenzmatrix (Gl. (27))

$$\begin{aligned}\det(\boldsymbol{I} + \boldsymbol{F}_0) = {} & (1 + S_{11}R_1)(1 + S_{22}R_2)(1 + S_{33}R_3) \\ & + S_{12}R_2S_{23}R_3S_{31}R_1 + S_{13}R_3S_{21}R_1S_{32}R_2 \\ & - S_{31}R_1(1 + S_{22}R_2)S_{13}R_3 \\ & - S_{32}R_2S_{23}R_3(1 + S_{11}R_1) \\ & - (1 + S_{33}R_3)S_{21}R_1S_{12}R_2\end{aligned} \tag{27}$$

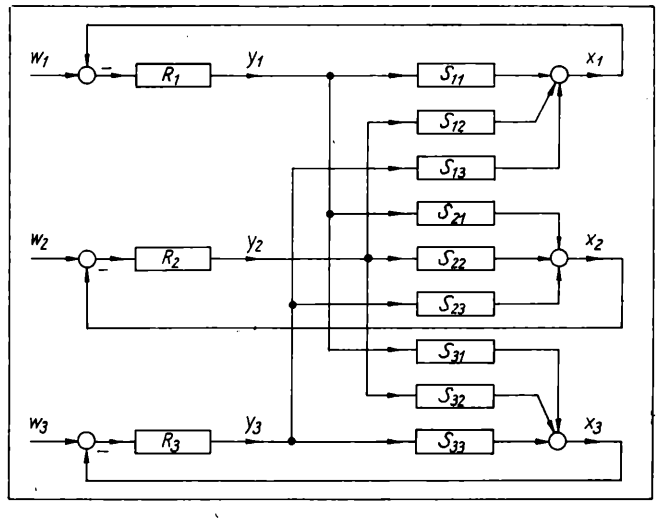
erhält man nach Abzug des Produktes der Hauptdiagonalelemente und Division durch dieses Produkt die Koppelfunktion F_{00} der nichtentkoppelten Dreigrößenregelung gemäß Gl. (28), wobei analoge Erweiterungen und Umformungen wie in Gl. (12) vorgenommen wurden.

$$\begin{aligned}F_{00}(p) = {} & \frac{S_{12}S_{23}S_{31}}{S_{11}S_{22}S_{33}} F_{w1}F_{w2}F_{w3} \\ & + \frac{S_{13}S_{32}S_{21}}{S_{11}S_{22}S_{33}} F_{w1}F_{w2}F_{w3} - \frac{S_{12}S_{21}}{S_{11}S_{22}} F_{w1}F_{w2} - \\ & - \frac{S_{13}S_{31}}{S_{11}S_{33}} F_{w1}F_{w3} - \frac{S_{23}S_{32}}{S_{22}S_{33}} F_{w2}F_{w3} .\end{aligned} \tag{28}$$

Im Gegensatz zur Zweigrößenregelung weisen die Koppelfunktionen $C_n(p)$ und $F_{00}(p)$ bei Mehrgrößenregelungen mit mehr als zwei Regelgrößen grundsätzlich mehrere Summanden auf, die im weiteren als Elementarfunktionen bezeichnet werden. Die Elementarfunktionen der Koppelfunktion F_{00} gemäß Gl. (28) können bei genauerer Betrachtung als Übertragungsfunktionen der Koppelschleifen der nichtentkoppelten Dreigrößenregelung identifiziert werden [13], wobei die Elementarfunktionen, die 3 Führungsübertragungsfunktionen als Faktoren enthalten, Koppelschleifen über die 3 einschleifigen Regelkreise — im weiteren kurz Dreierschleifen genannt — und die Elementarfunktionen mit jeweils zwei Führungsübertragungsfunktionen als Faktor Zweierschleifen beschreiben. Insgesamt treten gemäß Gl. (28) bei der nichtentkoppelten Dreigrößenregelung 2 Dreierschleifen und 3 Zweierschleifen auf, was mit den Aussagen über die Anzahl der Koppelschleifen in [8] übereinstimmt.

Der genaue Weg der einzelnen Koppelschleifen wird durch die Übertragungsfunktionen S_{ik} der Koppelstrecken in der jeweiligen Elementarfunktion bestimmt, die so geordnet sind, daß der 1. Index des folgenden Faktors mit dem 2. Index des vorausgehenden Faktors übereinstimmt. Unter diesen Bedingungen beschreibt die Reihenfolge der Indizes von S_{ik} — im Produkt von rechts nach links gelesen, weil der 2. Index die Eingangsgröße und der 1. Index die Ausgangsgröße bezeichnet — ein-

Bild 2. Signalflußbild der nichtentkoppelten Dreigrößenregelung



deutig den Weg der Koppelschleife. Zur Veranschaulichung wird der Verlauf der zur ersten Elementarfunktion gehörenden Koppelschleife mit Bezug auf das Signalflußbild der Dreigrößenregelung im Bild 2 betrachtet. Von y_1 ausgehend, wird die Koppelschleife über S_{31} nach x_3, von x_3 über den 3. einschleifigen Regelkreis mit der Übertragungsfunktion $-R_3/(1 + S_{33}R_3) = -F_{w3}/S_{33}$ nach y_3 geführt, von y_3 über S_{23} nach x_2, von x_2 über $-F_{w2}/S_{22}$ nach y_2, von y_2 über S_{12} nach x_1 und von x_1 über $-F_{w1}/S_{11}$ wieder zurück zu y_1 geleitet.

Bei der Verfolgung der Koppelschleife wird weiter offenbar, daß das Koppelsignal beim Passieren eines einschleifigen (nach Voraussetzung negativ rückgeführten) Regelkreises eine Vorzeichenumkehr erfährt. Dementsprechend übertragen Dreierschleifen strukturell negativ und gehen daher in die charakteristische Gleichung des gekoppelten Ersatzsystems $1 + F_{00}$ und F_{00} positiv ein. Die Zweierschleifen verhalten sich umgekehrt, wie auch aus Gl. (28) zu erkennen ist. Aus der Untersuchung der Viergrößenregelung [13] folgt, daß die Übertragungsfunktionen der echten Viererschleifen ebenso mit negativen Vorzeichen in F_{00} eingehen. Unter Berücksichtigung der Vorzeichenumkehr bei der Bildung der charakteristischen Gleichung des Ersatzsystems ist festzustellen, daß die Koppelschleifen ungerader Zahl positiv und die Koppelschleifen gerader Zahl negativ in $1 + F_{00}$ und F_{00} eingehen.

Beim Vergleich der Funktionen $C_n(p)$ und $F_{00}(p)$ gemäß Gl. (23) und Gl. (28) erkennt man, daß eindeutige Beziehungen zwischen ihren Elementarfunktionen bestehen. Die Elementarfunktionen von $F_{00}(p)$ ergeben sich aus den Elementarfunktionen von $C_n(p)$ durch Multiplikation mit eindeutig definierten Führungsübertragungsfunktionen der einschleifigen Kreise, und zwar ist jeder Übertragungsfunktion S_{lk} $(i \neq k)$ der Koppelstrecken eine Führungsübertragungsfunktion F_{wl} zugeordnet. Das folgt auch aus der oben betrachteten Koppelschleife, in der sich jeweils an eine Koppelstrecke S_{lk} die Übertragung durch einen Regelkreis mit der Übertragungsfunktion $-F_{wl}/S_{li}$ anschließt. Dieser einfache allgemeine Zusammenhang zwischen den Elementarfunktionen der Koppelfunktion der Strecke $C_n(p)$ und der Koppelfunktion der nicht entkoppelten Mehrgrößenregelung, der zweckmäßig zur einfachen Bestimmung der Gleichung für $F_{00}(p)$ im konkreten Anwendungsfall genutzt wird, hat tiefere Ursachen.

Die Mehrgrößenstrecke in P-kanonischer Struktur ist bekanntlich rückwirkungsfrei [2], und demzufolge können in der Strecke keine geschlossenen Schleifen auftreten. Die Elementarfunktionen der Koppelfunktion der Strecke $C_n(p)$ beschreiben Übertragungsfunktionen von Koppelwegen, die erst durch die Rückführung der Regelgrößen über die Regler geschlossen werden. Andererseits sind bei der nichtentkoppelten Mehrgrößenregelung die möglichen Koppelwege ausschließlich durch die Strecke bestimmt, denn die diagonale Reglermatrix, die bei dieser Regelung vorausgesetzt ist, bringt keine zusätzlichen Kopplungen zwischen den Kreisen. Es ist bereits an der Koppelfunktion der Strecke $C_n(p)$ abzulesen, welche Koppelschleifen auftreten, mit welchem Vorzeichen und Betrag der Übertragungsfunktionen der Koppelschleifen zu rechnen ist. Die Führungsfrequenzgänge der einschleifigen Kreise gehen bei der üblichen Einstellung $v_0 \leqq 0{,}5\, v_{0\,krit}$ entsprechend einem Dämpfungsgrad $D \gtrapprox 0{,}25$ in ihrem Betrag im Resonanzbereich nicht über den Wert $1/2\, D = 2$ hinaus und bewegen sich bei gedämpfteren Einstellungen in der Größenordnung von 1. Sie weisen aber im Bereich der Resonanz- und kritischen Frequenz wesentliche Phasenwinkel auf [6] und [10], so daß bei mehreren Führungsübertragungsfunktionen als Faktoren der Übertragungsfunktion der Koppelschleife immer mit einer Umfassung des kritischen Punktes $(-1, j0)$ durch die Koppelschleife zu rechnen ist, wenn der Betrag der Elementarfunktionen der Streckenkopplung $C_n(p)$ im Bereich der kritischen Frequenzen der einschleifigen Kreise größer 1 ist. Auf dieser Grundlage kann man kritische Koppelwege erkennen, mit Hilfe von $F_{00}(p)$ erforderlichenfalls überprüfen und weitere Strukturentscheidungen treffen (Wahl anderer Stell- und Regelgrößen-Zuordnungen oder Übergang zu nichtdiagonalen Reglermatrizen). Konkrete Beispiele von Zwei-, Drei- und Viergrößenregelungen mit wesentlichen kopplungsbedingten Einschränkungen (Allpaßverhalten) sind in [10] und [13] auf dieser Grundlage analysiert.

Zusammenfassung

Auf der Grundlage der Determinante der Übertragungsmatrix der Mehrgrößenstrecke und der Rückführdifferenzmatrix der Mehrgrößenregelung wird eine allgemeine Koppelfunktion der Mehrgrößenstrecke und der Mehrgrößenregelung definiert. Am Beispiel des Dreigrößensystems werden der konkrete Aufbau der Koppelfunktion der Mehrgrößenstrecke und Mehrgrößenregelung und ihre Beziehungen untereinander dargestellt. Die eingeführte Koppelfunktion der Mehrgrößenstrecke eignet sich gut, die Kopplung des Gesamtsystems einzuschätzen, kopplungsbedingte Schwierigkeiten (Allpaßverhalten) für die Regelung zu erkennen und auf dieser Grundlage Schlußfolgerungen für die zweckmäßige Regelungsstruktur zu ziehen.

In weiteren Beiträgen soll die Analyse von Mehrgrößensystemen auf dieser Grundlage an konkreten Beispielen erläutert werden.

Literatur

[1] *Schwarz, H.:* Stabilitätsverhalten entkoppelter Zweifachregelkreise. msr **10** (1967) H. 2, S. 49–57.

[2] *Schwarz, H.:* Mehrfachregelungen. Bd. 1 und 2. Westberlin/Heidelberg: Springer-Verlag 1967, 1971.

[3] *Krämer, W.:* Grenzen und Möglichkeiten nicht entkoppelter linearer Zweifachregelungen. VDJ – Zeitschrift. Fortschrittsberichte. Reihe 8, Nr. 10. Sept. 1968.

[4] *Zietz, H.:* Zur Analyse und Synthese gekoppelter Zweifachregelkreise. msr **12** (1969) H. 7, S. 277–280.

[5] *Zietz, H.:* Vergleichende Betrachtung entkoppelter und gekoppelter Zweifachregelungen. Wiss. Zeitschr. TH Magdeburg **13** (1969) H. 7, S. 609–619.

[6] *Zietz, H.:* Beitrag zur Analyse und Synthese gekoppelter Zweigrößenregelungen. Dissertation TH Magdeburg 1970.

[7] *Zietz, H.:* Stabilitätsbetrachtung und Reglerentwurf bei nicht entkoppelten Zweigrößenregelungen. msr **16** (1973) H. 3, S. 84–88.

[8] *Birnstiel, K.:* Beitrag zur Projektierung von Mehrgrößensystemen, insbesondere zur Stellgrößen-Regelgrößen-Zuordnung. Dissertation TH Leipzig 1978.

[9] *Birnstiel, K.:* Zur Projektierung von Mehrgrößenregelungen bei geringer und besserer Streckenkenntnis. msr **21** (1978) H. 4, S. 209–214.

[10] *Zietz, H.:* Analyse der Regelung von Zweigrößenstrecken mit Allpaßverhalten. Forschungsbericht IV/1 IH Wismar, Sektion TdE/E 1980.

[11] *Solodownikow, W. W.:* Stetige lineare Systeme. Berlin: VEB Verlag Technik 1971.

[12] *Rosenbrock, H. H.:* Computer – aided control system design. London: Academic Press Inc. 1974.

[13] *Zietz, H.:* Analyse nicht entkoppelter Mehrgrößenregelungen mit mehr als zwei Regelgrößen. Forschungsbericht IV/2 IH Wismar, Sektion TdE/E 1980.

[14] *Popow, V. M.:* Hyperstability and optimality of automatic systems with several control functions. Revue Roumaine de Sciences Techniques – Electronics and Energetics Vol. 9 (1964) Bucharest.

[15] *Hsu, C. H.; Chen, C. T.:* A proof of stability of multivariable feedback systems. Proc. IEE 56 (1968) pp. 2061 and 2062.

[16] *Rosenbrock, H. H.:* Design of multivariable control systems using the inverse Nyquist array. Proc. IEE Vol. **116** (1969) No. 11, pp. 1929–1936.

[17] *Rosenbrock, H. H.:* The stability of multivariable systems. Trans. IEEE AC-17 (1972) pp. 105–107.

[18] *Mayne, D. Q.:* The design of linear multivariable systems. Automatica 9 (1973) pp. 201–207.

msr 7541

Doz. Dr.-Ing. *S. M. Zonkov*, Sofia[1])

Systeme mit Vergleichsmodell und veränderlicher Struktur

0. Einleitung

Zwei alternative Wege, die dynamischen Eigenschaften eines Regelungssystems invariant gegenüber Parameterstörungen der Strecke zu machen, sind die Adaption des Reglers und die Umschaltung seiner Struktur zur Realisierung eines Gleitregimes. Nachstehend wird gezeigt, daß durch eine sinnvolle Vereinigung der Regelungssysteme mit veränderlicher Struktur (RVS) und der Adaptivsysteme mit Vergleichsmodell (ASVM) verbesserte Systemeigenschaften entstehen, die im Vergleich zu SVS vor allem den Systemübergang bis zum Einsetzen der Gleitbewegung betreffen und gegenüber den ASVM leichter realisierbar sind.

1. Ableitung der Aufgabenstellung

In den letzten Jahren sind viele wissenschaftliche Arbeiten den Problemen der Analyse und Synthese adaptiver Systeme mit Vergleichsmodell (ASVM) für die automatische Regelung gewidmet worden, in denen aus theoretischer Sicht die mit der Stabilität und Qualität der Regelung verbundenen Fragen gelöst wurden [1] bis [3]. Adaptive Regelungen mit Vergleichsmodell realisieren auch einen großen Grad der Invarianz dynamischer Kennziffern in bezug auf äußere und parametrische Instationaritäten $F(t)$ bzw. $A(t)$ durch Nachführung der Steuereinrichtung (SE), die die gewünschte Steuerung u (Bild 1)

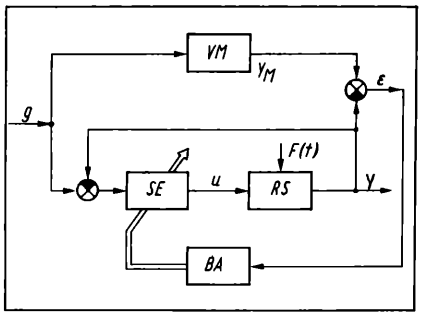


Bild 1. Adaptive Regelung mit Vergleichsmodell

formiert. Die Steuerung u wird nach einem verallgemeinerten Fehler des ASVM $\varepsilon = y_m - y$ realisiert, wobei y_m die Ausgangsgröße des Vergleichsmodells (VM) und y die Ausgangsgröße der Regelstrecke (RS) ist. Die aktuellen Parameter des adaptiven Vergleichsmodells VM werden durch den Adaptionsblock (BA), der eine komplizierte und nichtlineare Struktur hat, ermittelt und vorgegeben. Das ist das grundlegende Problem bei der praktischen hardwaremäßigen Realisierung dieses Teils des ASVM. Ein anderes Problem besteht aus praktischer Sicht in der Notwendigkeit, den vollständigen Zustandsvektor des ASVM für die Realisierung des gegebenen Gütefunktionals zur Verfügung zu haben. Gleichzeitig entwickelte sich auch die Theorie einer anderen Klasse von Systemen für hochgenaue Regelungen — die Theorie der Systeme mit veränderlicher Struktur (SVS). Charakteristisch für sie ist, daß sie quasi invariant gegenüber äußeren und parametrischen Instationaritäten des Systems [4] und [5] sind, aber auch eine hohe dynamische Güte mit Hilfe leicht realisierbarer Steueralgorithmen (-strukturen) ermöglichen. In SVS werden abschnittweise lineare Strukturen durch Umschaltung einer (vom technischen Standpunkt) maximal zulässigen Anzahl von Koeffizienten des geschlossenen Systems realisiert. Es muß darauf hingewiesen werden, daß besonders nützliche Eigenschaften entstehen, wenn sich das SVS im Gleitzustand befindet. Der erste Hinweis der Vereinigung der positiven Eigenschaften von ASVM und SVS zur Beseitigung der Realisierungsprobleme bei ASVM ist in [2] zu finden. Hier wird die Einführung von Komponenten mit Relaisumschaltung mit logischen Umschaltgesetzen zur Formierung der adaptiven Steuerung vorgeschlagen. Umgekehrt wurden auch für die Lösung von Identifikationsproblemen in einer Klasse von SVS einige der Prinzipien von ASVM ausgenutzt [5].

Eine ausführliche Untersuchung und Begründung dieser neuen Klasse von Systemen, der Systeme mit Vergleichsmodell und veränderlicher Struktur (SVMVS), die die positiven Eigenschaften der ASVM und der SVS vereinigen, wurde in [7] durchgeführt. Im Beitrag wird vorgeschlagen, SVMVS als eine Unterklasse von Systemen zu betrachten, die man auf der einen Seite den ASVM und auf der anderen Seite den SVS zuordnen kann. Das Ziel der Arbeit besteht in der Formulierung und Ausarbeitung bestimmter Seiten der Synthese von SVMVS mit einem Eingang und einem Ausgang und in der Ableitung von Schlußfolgerungen.

2. Systembeschreibung und -entwurf

Das Steuerungsobjekt (RS) kann man in der folgenden Matrixschreibweise vorgeben

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{A}(t)\,\boldsymbol{x} + \boldsymbol{b}(t)\,u \qquad (1)$$
$$y = \boldsymbol{G}^T \cdot \boldsymbol{x}$$

mit

$\boldsymbol{x}^T = [x_1, x_2, \ldots, x_n]$ — Zustandsvektor des Regelungsobjektes

u — skalare Steuerung

y — skalarer Ausgang

$\boldsymbol{b}(t)$ und $\boldsymbol{G}$ — n-dimensionale Vektoren der Form

$\boldsymbol{b}^T(t) = [0\ 0 \ldots b_0(t)]$, $\quad \boldsymbol{G}^T = [1\ 0 \ldots 0]$

$\boldsymbol{A}(t)$ — (n, n) — dimensionale nichtstationäre Matrix, die in folgender „Begleitform" gegeben ist

$$\boldsymbol{A}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & & 0 \\ 0 & 0 & 1 & & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ 0 & 0 & 0 & \ldots & 1 \\ -a_0(t) & -a_1(t) & -a_2(t) & \ldots & -a_{n-1}(t) \end{bmatrix}.$$

In der Mehrzahl der Fälle ändern sich die Parameter des Objektes $(a_i(t) = \text{var.}, b_0(t) = \text{var.}, i = \overline{1, n-1})$, wobei vorausgesetzt wird, daß der Bereich der Veränderung bekannt ist

$$\left.\begin{aligned} 0 < b_{0\,\min} \leqq b_0(t) \leqq b_{0\,\max} \\ a_{i\,\min} \leqq a_i(t) \leqq a_{i\,\max}, \quad i = \overline{0, n-1}. \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

Das Vergleichsmodell ist zum geschlossenen System parallel angeordnet. Seine dynamischen Eigenschaften werden durch die gewünschten dynamischen Parameter des Ausgangssystems bestimmt. Dabei kann man die Dynamik des VM durch das folgende Gleichungssystem beschreiben:

$$\dot{\boldsymbol{x}}_M = \boldsymbol{A}_M \boldsymbol{x}_M + \boldsymbol{b}_M g \qquad (3)$$
$$y_M = \boldsymbol{G}^T \boldsymbol{x}_M$$

[1]) Mitteilung aus der Hochschule für Maschinenbau und Elektrotechnik „Lenin" Sofia.

mit

$\boldsymbol{x}_{\mathrm{M}}^{T} = [x_1^M x_2^M \dots x_{\mathrm{n}}^M]$ – Zustandsvektor

y_{M} – skalarer Ausgang des Modells

G – skalarer Eingang (Führungsgröße) des SVMVS

$\boldsymbol{b}_{\mathrm{M}}$ – n-dimensionaler Vektor der folgenden Form: $\boldsymbol{b}_{\mathrm{M}}^{T} = [0 \quad 0 \dots b_0^{\mathrm{M}}]$

$\boldsymbol{A}_{\mathrm{M}}$ – eine konstante (n, n)-Matrix, die in folgender Form gegeben ist

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{M}} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & & 0 \\ 0 & 0 & 1 & & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_0^M & -a_1^M & -a_2^M & \dots & -a_{\mathrm{n}-1}^M \end{bmatrix}.$$

Wenn man $\boldsymbol{\varepsilon}^T = [\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \dots \varepsilon_{\mathrm{n}}]$ setzt, dann kann man die Vektorelemente des allgemeinen Fehlers $\boldsymbol{\varepsilon}$ aus dem Zusammenhang

$$\varepsilon_{\mathrm{i}} = x_{\mathrm{i}}^M - x_{\mathrm{i}}; \quad i = \overline{1, n} \tag{4}$$

bestimmen.

Zur Untersuchung des ASVM ist es notwendig, die zugehörige verallgemeinerte Fehlergleichung zu bestimmen. Sie ergibt sich durch die gemeinsame Lösung der Gln. (1), (3) und (4) und hat die folgende Form

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}} = \boldsymbol{A}_{\mathrm{M}}\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{D}(t)\,\boldsymbol{x} + \boldsymbol{b}_{\mathrm{M}}g - \boldsymbol{b}(t)\,u \tag{5}$$

mit $\boldsymbol{D}(t)$-(n, n)-Matrix der Form

$$\boldsymbol{D}(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & & 0 \\ 0 & 0 & 1 & & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ d_0(t) & d_1(t) & d_2(t) & \dots & d_{\mathrm{n}-1}(t) \end{bmatrix},$$

wobei $d_{\mathrm{i}}(t) = a_{\mathrm{i}}(t) - a_{\mathrm{i}}^M$, $\forall_{\mathrm{i}} = \overline{0, n-1}$ gesetzt wurde.

Um die Gl. (5) invariant gegenüber parametrischer Instationarität zu machen, besteht die Möglichkeit, eine solche Steuerfunktion aus einer Klasse von SVS auszuwählen, daß eine stabile Bewegung im Gleitzustand garantiert ist, d. h.

$$\lim_{t\to\infty} \boldsymbol{\varepsilon}(t) \to 0\,. \tag{6}$$

Für diesen Fall wird in Gl. (5) eine Steuerung u in folgender Form festgelegt:

$$u = \boldsymbol{\psi}_{\varepsilon}^{T}\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\psi}_{\mathrm{x}}^{T}\boldsymbol{x} + \psi_{\mathrm{g}}g\,, \tag{7}$$

wobei die Werte der Vektorfunktionen $\boldsymbol{\psi}_{\varepsilon}^{T}$ und $\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{x}}^{T}$ sowie der Skalar ψ_{g} auf einer Hyperfläche S, die durch die Gl. (8)

$$S = \boldsymbol{c}^{T}\boldsymbol{\varepsilon} = 0 \tag{8}$$

gegeben ist, umgeschaltet werden.

Demzufolge gilt

$$\boldsymbol{\psi}_{\varepsilon}^{T} = [\psi_{\varepsilon}^{1}\psi_{\varepsilon}^{2} \dots \psi_{\varepsilon}^{k}] \tag{9a}$$

$$\psi_{\varepsilon}^{2} = \begin{cases} \alpha_{\varepsilon}^{i}, \varepsilon; s > 0\,, \\ \beta_{\varepsilon}^{i}, \varepsilon; s < 0 \end{cases} \qquad i = \overline{1, k} \tag{9b}$$

$$\boldsymbol{\psi}_{\mathrm{x}}^{T} = [\psi_{\mathrm{x}}^{1}\psi_{\mathrm{x}}^{2} \dots \psi_{\mathrm{x}}^{n}] \tag{10a}$$

$$\psi_{\mathrm{x}}^{j} = \begin{cases} \alpha_{\mathrm{x}}^{j}; x_{\mathrm{j}} S > 0\,, \\ \beta_{\mathrm{x}}^{j}; x_{\mathrm{j}}\, S < 0 \end{cases} \qquad i = \overline{1, n} \tag{10b}$$

$$\psi_{\mathrm{g}} = \begin{cases} \alpha_{\mathrm{g}}, & g\,S > 0 \\ \beta_{\mathrm{g}}, & gS < 0\,. \end{cases} \tag{11}$$

Das Gleitregime entsteht auf der Hyperfläche $S = 0$, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind [4]:

$$\left.\begin{aligned} \lim_{S\to+0} \dot{S} < 0 \\ \lim_{S\to-0} \dot{S} > 0\,. \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

Wenn man die Bedingungen (12) auch der Gl. (5) des ASVMVS und der Gl. (7) seiner Steuerung auferlegt, ergeben sich folgende Begrenzungen für die Auswahl der Umschaltkoeffizienten:

a) für $K = n$:

$$\left.\begin{aligned} \alpha_{\varepsilon}^{i} &= \sup_{b_0(t)} \frac{1}{b_0(t)}\left[\frac{c_{\mathrm{i}-1}}{c_{\mathrm{n}}} - a_{\mathrm{i}-1}^M\right], \\ \beta_{\varepsilon}^{i} &< \inf_{b_0(t)} \frac{1}{b_0(t)}\left[\frac{c_{\mathrm{i}-1}}{c_{\mathrm{n}}} - a_{\mathrm{i}-1}^M\right], \quad i = \overline{1, n} \end{aligned}\right\} \tag{13}$$

$$\left.\begin{aligned} \alpha_{\mathrm{x}}^{j} &> \sup_{b_0(t),\ a_{\mathrm{j}}(t)} \frac{1}{b_0(t)}[d_{\mathrm{j}-1}], \\ \beta_{\mathrm{x}}^{j} &< \inf_{b_0(t),\ a_{\mathrm{j}}(t)} \frac{1}{b_0(t)}[d_{\mathrm{j}-1}], \quad j = \overline{1, n} \end{aligned}\right\} \tag{14}$$

$$\left.\begin{aligned} \alpha_{\mathrm{g}} &> \sup_{b_0(t)} \frac{b_0^M}{b_0(t)} \\ \beta_{\mathrm{g}} &< \inf_{b_0(t)} \frac{b_0^M}{b_0(t)}. \end{aligned}\right\} \tag{15}$$

b) für $K = n - 1$:

Aus der Gl. (8) erhält man für die Umschalt-Hyperfläche

$$\varepsilon_{\mathrm{n}} = -\sum_{i=1}^{n-1} \frac{c_{\mathrm{i}}}{c_{\mathrm{n}}}\,\varepsilon\,. \tag{16}$$

Daraus folgt, daß man die Anzahl der Umschaltkanäle für den Fehler $\boldsymbol{\varepsilon}$ um 1 vermindern kann. Dabei ergeben sich für die Umschaltkoeffizienten (13) folgende Begrenzungen

$$\left.\begin{aligned} \alpha_{\varepsilon}^{i} &> \sup_{b_0(t)} \frac{1}{b_0(t)}\left[\frac{c_{\mathrm{i}-1}}{c_{\mathrm{n}}} - a_{\mathrm{i}-1}^M - \frac{(c_{\mathrm{n}-1} - c_{\mathrm{n}}a_{\mathrm{n}-1}^M)\,c_{\mathrm{i}}}{c_{\mathrm{n}}}\right] \\ \beta_{\varepsilon}^{i} &< \inf_{b_0(t)} \frac{1}{b_0(t)}\left[\frac{c_{\mathrm{i}-1}}{c_{\mathrm{n}}} - a_{\mathrm{i}-1}^M - \frac{(c_{\mathrm{n}-1} - c_{\mathrm{n}}a_{\mathrm{n}-1}^M)\,c_{\mathrm{i}}}{c_{\mathrm{n}}}\right], \\ & \qquad i = \overline{1, n-1}\,. \end{aligned}\right\} \tag{17}$$

c) für $K < n - 1$:

In diesem Fall behält die Ungl. (17) ihre Gültigkeit für $\forall i = \overline{1, k}$; es werden jedoch noch folgende zusätzliche Begrenzungen auferlegt

$$\frac{c_{\mathrm{n}}(c_{\mathrm{i}-1} - c_{\mathrm{n}} - a_{\mathrm{i}-1}^M)}{c_{\mathrm{i}}} = c_{\mathrm{n}-1} - c_{\mathrm{n}}\,a_{\mathrm{n}-1}^M\,. \tag{18}$$

Bevor man an die Formierung der Steuerung für $K < n - 1$ herangeht, ist es nötig, die Erfüllung der Bedingungen (18) zu überprüfen.

Bei Erfüllung aller Bedingungen für die Auswahl der Parameter des Steuervektors (7) in SVMVS entsteht eine stabile Gleitbewegung, die man mit der Methode der äquivalenten Steuerung [5] wie folgt bestimmen kann

$$u_{\mathrm{äq}} = \frac{1}{b_0}\left[-a_0^M\varepsilon_1 + \sum_{i=2}^{n}\left(\frac{c_{\mathrm{i}-1}}{c_{\mathrm{n}}} - a_{\mathrm{i}-1}\right)\varepsilon_{\mathrm{i}} + \sum_{i=1}^{n}(d_{\mathrm{i}-1}x_{\mathrm{i}} + b_0^M g)\right]. \tag{19}$$

Wenn man berücksichtigt, daß das Gleitregime auf der Hyperfläche $S = 0$ auftritt und wenn die Gl. (19) in die Gl. (5) eingesetzt wird, erhält man folgende Bewegungsgleichung des

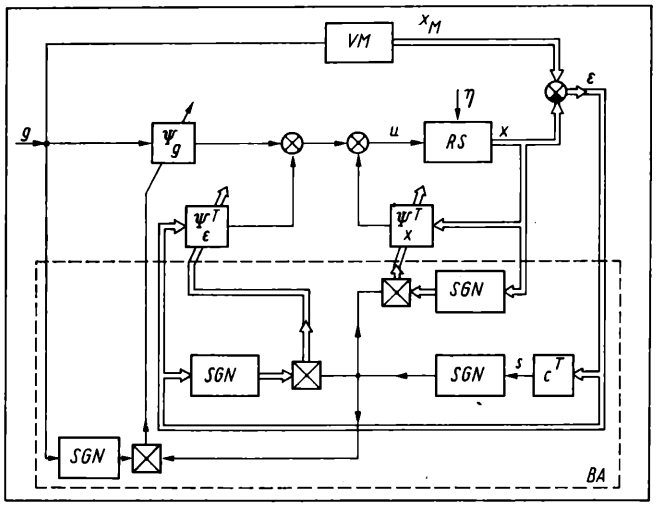


Bild 2. Regelungssystem mit Vergleichsmodell und veränderlicher Struktur (SVMVS)

SVMVS, die sich als $(n-1)$. Ordnung erweist

$$\dot{\varepsilon}^* = A_1 \varepsilon^* \tag{20}$$

mit

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & & 0 \\ 0 & 0 & 1 & & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & & 1 \\ -\frac{c_1}{c_n} & -\frac{c_2}{c_n} & -\frac{c_3}{c_n} & \cdots & -\frac{c_{n-1}}{c_n} \end{bmatrix}$$

$$\varepsilon^* = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_{n-1} \end{bmatrix}.$$

Nach der Entstehung des Gleitregimes werden die Stabilität des Systems und die Güte des Übergangsprozesses nur noch durch die Koeffizienten $\tilde{c} = c_1/c_n$ bestimmt, die nicht von den instationären Parametern des Objektes abhängen. Folglich ergibt sich aus Gl. (20), daß das System nach der Entstehung des Gleitregimes invariant gegenüber der parametrischen Instationarität ist. Wenn man berücksichtigt, daß bis zum Moment des Erreichens des Gleitregimes die Invarianz nicht vorhanden ist, dann ist das SVMVS quasi invariant. Durchgeführte Untersuchungen zeigten, daß die Berücksichtigung der Komponenten des Vektors ε im Steuerungsgesetz (7) zu einer bedeutenden Verbesserung des Übergangsprozesses des ASVMVS führt.

Das auf diese Art und Weise erhaltene parametrische quasi invariante SMVS rechtfertigt bis zu einem gewissen Grade die Behauptung, daß es adaptive Eigenschaften ähnlich dem ASVM hat. Wenn es gelingt, die Vektorfunktionen ψ_ε und ψ_x sowie den Skalar ψ_g in Form der Parameter der Umschaltbedingungen darzustellen, dann kann man das SVMVS entsprechend Bild 2, das einem ASVM mit parametrischer Adaption äquivalent ist, veranschaulichen [2]. In diesem Fall entspricht der Vektor C^T völlig dem linearen Kompensator des allgemeinen Fehlers bei ASVM, der mit den Methoden der Hyperstabilität synthetisiert wird [3], wobei sich jedoch der realisierte nichtlineare Teil des Adaptionsblockes mit Hilfe der Prinzipien der SVS aus praktischer Sicht als leicht realisierbar erweist. Folglich vereinigt das Auftreten des Gleitregimes diese zwei Systemklassen zu einer qualitativ hochwertigen automatischen Steuerung nichtstationärer Objekte.

Unter realen Bedingungen wird das RS nicht nur durch die parametrischen Instationaritäten beeinflußt, sondern es verändern sich auch die äußeren Störgrößen $F(t)$ (Bild 1). Wenn die Dynamik der Störung $F(t)$ durch Differentialgleichungen beschrieben wird, dann stehen bestimmte Funktionen dieser Gleichung im rechten Teil der Gleichung des SVMVS.

Diese Gleichung ist teilweise stetig, im Unterschied zu den parametrischen Instationaritäten, die sich in der Variation der Koeffizienten in der zugrunde liegenden Differentialgleichung ausdrücken.

Die Hauptaufgabe der adaptiven Systeme ist die Kompensation parametrischer Instationaritäten, aber unter dem Gesichtspunkt der vollständigen Funktionsfähigkeit müssen sie auch die auftretenden äußeren Störungen in der RS kompensieren. Dieses Prinzip ist auch für SVMVS wichtig. Bei Vorhandensein äußerer Störungen $F(t)$ lautet die Zustandsgleichung des Objektes folgendermaßen

$$\dot{x} = A(t)\, x + b(t)\, u + h\, F(t)\,, \tag{21}$$

wobei $A(t)$ und $b(t)$ die gleichen Ausdrücke wie in Gl. (1) sind. h ist ein n-dimensionaler Vektor der Form $h^T = [0\ 0\ \ldots\ 1]$, $F(t)$ ist eine skalare Störung, die einer bestimmten Klasse von Funktionen angehört.

Bei Vorhandensein eines Vergleichsmodells entsprechend Gl. (3) erhält man die Gleichung des allgemeinen Fehlers des SVMVS in folgender Form

$$\dot{\varepsilon} = A_M \varepsilon + D(t)\, x + b_M g - h\, F(t) - b(t)\, u\,. \tag{22}$$

Hierbei ist die Matrix $D(t)$ die gleiche wie in Gl. (5). Es läßt sich leicht feststellen, daß für SVMVS, die durch die Gl. (22) beschrieben werden, die durch Gl. (7) gegebene Steuerung nicht zum Gleitregime führt. Zur Sicherung einer stabilen Bewegung im Gleitregime bei SVMVS ist es für $F(t) \neq 0$ unbedingt erforderlich, einen zusätzlichen Umschaltkanal vorzusehen. Die zugehörige Steuerfunktion erhält man in folgender Form

$$u = \psi_\varepsilon^T \varepsilon + \psi_x^T x + \psi_g^* g + \psi_F\, F(t)\,. \tag{23}$$

Der Skalar ψ_F weist Unstetigkeiten erster Ordnung auf der Hyperfläche S auf (Gl. (8)) und hat folgende Form

$$\psi_F = \begin{cases} \alpha_F, & FS > 0 \\ \beta_F, & FS < 0 \end{cases}. \tag{24}$$

Zur Befriedigung der Bedingung (12) sind neue Umschaltkoeffizienten, die den Bedingungen

$$\left.\begin{aligned} \alpha_F &> \max \frac{1}{b_0(t)} \\ \beta_F &< \min \frac{1}{b_0(t)} \end{aligned}\right\} \tag{25}$$

genügen, erforderlich.

Damit tritt im SVMVS eine Bewegung im Gleitregime auf, die invariant gegenüber äußeren Störungen $F(t)$ ist.

3. Beispiel

Die Dynamik eines der Steuerungskanäle eines chemischen Reaktors [7] kann man durch folgende Gleichung darstellen

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_0(t) & -a_1(t) \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ b_0(t) \end{bmatrix} u$$

$$y = [1 \quad 0]\, x\,.$$

Die Parameter dieses Steuerkanals des Reaktors verändern sich nach einem unbekannten Gesetz in folgenden Grenzen

$$0{,}19 \leqq b_0(t) \leqq 2{,}94$$

$$0{,}021 \leqq a_0(t) \leqq 0{,}107$$

$$0{,}19 \leqq a_1(t) \leqq 7{,}119.$$

Die Gleichung des Vergleichsmodells kann man in folgender Form vorgeben

$$\dot{x}_M = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -9{,}0 & -4{,}2 \end{bmatrix} x_M + \begin{bmatrix} 0 \\ 9{,}0 \end{bmatrix} u$$

$$y_M = [1 \quad 0]\, x_M\,.$$

Das Regelungsgesetz für das synthetisierte SVMVS gebe man in folgender Form vor:

$$u = (44\varepsilon_1 + 48\,[x_1] + 20\,[x_2] + 48\,[g]) \cdot \operatorname{sgn} S$$

und die Gleichung der Hyperfläche des Gleitvorganges mit

$$S = 4\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 0\,.$$

Die durchgeführte digitale Modellierung mit Hilfe der Sprache CSMP bestätigt die Funktionsfähigkeit des Systems bei verschiedenen Anfangsbedingungen aus dem zulässigen Änderungsbereich ihrer Parameter und ergibt quasi Invarianz bezüglich äußerer und parametrischer Instationarität.

Im Bild 3a sind ein Beispiel eines Übergangsprozesses des allgemeinen Fehlers $\varepsilon(t)$ sowie der Übergangsprozesse der Koordinaten y_M des Vergleichsmodells und $y(t)$ des Regelungsobjektes für eine sprungförmige Änderung des Sollwertes des SVMVS $g(t) = g \cdot 1(t)$ dargestellt.

Im Bild 3b ist die Form des Steuersignals $u(t)$ gezeigt.

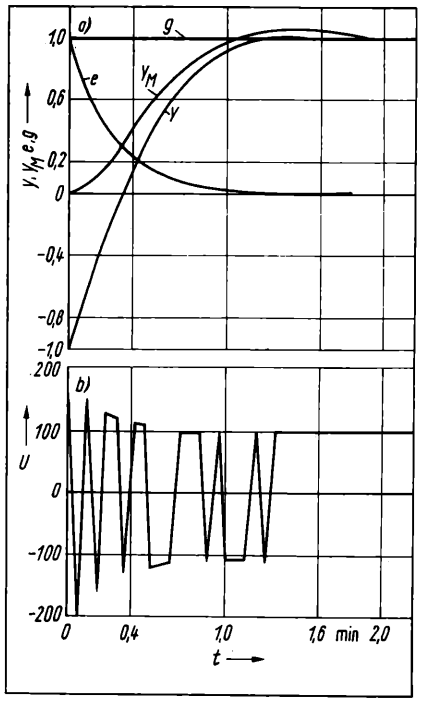


Bild 3. Systemantworten des SVMVS bei Führungssprung

a) Modellausgang y_M, Streckenausgang y und Fehler e; b) Steuergröße u

Zusammenfassung

Die betrachteten Systeme für eine qualitativ hochwertige automatische Steuerung mit SVMVS haben adaptive und quasi invariante Eigenschaften und können sowohl einer Klasse von ASVM als auch SVS zugeordnet werden. Daraus folgt, daß sie eine Unterklasse bilden, die aus beiden Systemen gebildet wird. Die positiven Eigenschaften des SVMVS gegenüber den SVS bestehen in einer großen Flexibilität der Synthese durch das Auftreten des allgemeinen Fehlers ε im Steuerungsgesetz, aber auch in der Verbesserung der dynamischen Kennwerte des Übergangsprozesses bis zum Moment des Übergangs in den Gleitzustand. Wenn man die SVMVS mit den ASVM vergleicht, dann hat man erstens eine leicht realisierbare Struktur und zweitens bessere Möglichkeiten für die Gestaltung des Übergangsprozesses des allgemeinen Fehlers $\varepsilon(t)$. Bei diesen positiven Eigenschaften kann man erwarten, daß das hier vorgeschlagene Modell der SVMVS eine reale und beschleunigte Anwendung in verschiedenen Gebieten der automatischen Steuerung findet.

Literatur

[1] *Landau, I. D.*: Les systemes adaptivs avec modéle. Automatisme vol. 15 (1971) pp. 272—292.

[2] *Landau, I. D.*: A survey of model reference adaptive techniques — theory and applications. Automatica vol. 10 (1971) pp. 353—379.

[3] *Zonkov, S. M.; Simeonov, I. S.*: Synthese von Adaptivsystemen mit Vergleichsmodell nach der Methode der Hyperstabilität (bulg.).). Techniceskaja mysl 4 (1980) S. 7—14.

[4] *Jemeljanow, S. W.* u. a.: Theorie der Systeme mit veränderlicher Struktur (russ.). Moskau: Nauka 1970.

[5] *Utkin, B. I.*: Das Gleitregime und seine Anwendung in Systemen mit veränderlicher Struktur (russ.). Moskau: Nauka 1971.

[6] *Young, K. D.*: Asymptotic stability of model reference systems with variable structure control. IEEE Trans. on Aut. Control Vol. AI-22 (1977) pp. 279 to 281.

[7] *Zonkov, S. M.; Simeonov, I. S.; Marinov, M. T.*: Synthese eines Adaptivsystems mit Vergleichsmodell für einen konkreten technologischen Prozeß (bulg.). Material einer Wiss. Tagung im WMEI Sofia, April 1978.

msr 7553

Dipl.-Math. *D. Biedermann*, Magdeburg[1])

Verfahren der dezentralen Eigenwertverschiebung

IA 2.3.1.7.

0. Einleitung

Mit dem Auftreten sog. „großer Systeme" in der Regelungstheorie in den siebziger Jahren eröffnete sich die Frage nach einer Strukturierung des Reglers sowohl aus technologischer, ökonomischer als auch aus sicherheitstechnischer Hinsicht. Dem Tatbestand, daß diese Systeme oftmals aus miteinander verkoppelten Teilsystemen zusammengefügt sind, sollte nun mit der denzentralen Regelung mehr Rechnung getragen werden. Allerdings bereitet derzeit noch die beschränkte Verfügbarkeit der nur lokal meßbaren Größen bei der Entwicklung spezieller Entwurfsverfahren große Schwierigkeiten. Im wesentlichen unterscheiden sich hier Methoden des zentralen Entwurfs von denen des dezentralen für eine dezentrale Regelung [6].

Im folgenden soll das Problem der dezentralen Eigenwertverschiebung eines Mehrgrößensystems, vorliegend in Zustandsraumbeschreibung, behandelt werden. Hierfür sind eine Reihe von Existenzaussagen bekannt, insbesondere verbunden mit dem Begriff der festen Modi [5]. In [1] wurde unter Verwendung des geometrischen Konzepts für die Zustandsraumbeschreibung eine Zerlegung des Mehrgrößensystems in Teilsysteme vorgestellt. Dieser Zerlegung geht jedoch eine qualitative Untersuchung über die Beeinflussung der einem Teilregler verfügbaren lokalen Meßgrößen durch die Stellgrößen eines anderen Teilreglers voraus. Hierfür müßten bei praktischer Umsetzung in einen Algorithmus diverse Matrixübertragungsfunktionen berechnet werden, was großen numerischen Aufwand erforderlich macht. Mit diesem Beitrag wird eine einfache Zerlegungsmethode dargelegt, die keinerlei numerischer Rechnungen bedarf und die Vorstufe für einen zentralen Entwurf eines stabilisierenden dynamischen Reglers an den Teilsystemen bildet.

Offensichtlich kann in der Praxis nicht davon ausgegangen werden, daß alle Elemente der Matrizen quantitativ genau angebbar sind. Vielmehr muß Meßfehlern, Alterungserscheinungen, umgebungsbedingten Parameterschwankungen und Fertigungstoleranzen Rechnung getragen werden. Daher wird in diesem Beitrag davon ausgegangen, daß nur die identisch

[1]) Mitteilung aus der TH „Otto von Guericke" Magdeburg, Sektion TK/ET, WB Regelungstechnik und Prozeßsteuerungen.

verschwindenden Elemente als Null fixiert sind, während alle übrigen als verschieden von Null, jedoch nicht näher bekannt, zu betrachten sind.

Die Zustandsgrößen des großen Systems werden gewissen Teilsystemen zugeordnet. Waren sie ursprünglich physikalisch interpretierbar, so bleiben sie es auch nach der Zerlegung. Die Vorzüge dieser Permutationen werden allerdings dadurch erzielt, daß eine Reihe von Eigenschaften nur für „fast alle" Systeme einer betrachteten Struktur gelten.

1. Wechselwirkungen zwischen den Teilreglern

Gegeben sei ein lineares zeitinvariantes Mehrgrößensystem

$$\left.\begin{aligned} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{x}(t) &= \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) + \sum_{i=1}^{N} \boldsymbol{B}_i \boldsymbol{u}_i(t) \\ \boldsymbol{y}_i(t) &= \boldsymbol{C}_i \boldsymbol{x}(t) \qquad i \in \boldsymbol{N} \overset{\text{def}}{=} \{1, 2, \ldots, N\} \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

mit dem n-dimensionalen Zustandsvektor $\boldsymbol{x}$, den m_i-dimensionalen Vektoren der lokalen Eingangsgrößen $\boldsymbol{u}_i$ und den r_i-dimensionalen Vektoren der lokal meßbaren Ausgangsgrößen $\boldsymbol{y}_i$. Das System (1) sei kurzfassend durch $(\boldsymbol{C}_i, \boldsymbol{A}, \boldsymbol{B}_i, \boldsymbol{N})$ und die Systemmatrix mit $\boldsymbol{A} = [a_{ji}]$ bezeichnet. Hierfür sind N Teilregler ($i = 1, 2, \ldots, N$)

$$\left.\begin{aligned} \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{z}_i(t) &= \boldsymbol{F}_{11}^i \boldsymbol{z}_i(t) + \boldsymbol{F}_{12}^i \boldsymbol{y}_i(t) \\ \boldsymbol{u}_i(t) &= \boldsymbol{F}_{21}^i \boldsymbol{z}_i(t) + \boldsymbol{F}_{22}^i \boldsymbol{y}_i(t) \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

zu finden, die eine bestimmte Eigenwertplazierung gewährleisten sollen. Schließt man die Teilregler nacheinander an die Regelstrecke an, so können dabei unerwünschte Veränderungen in der Eigenwertverteilung auftreten. Nach einer Fixierung aller Matrizenelemente gilt $\boldsymbol{C}_2(\lambda \boldsymbol{I} - \boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{B}_1 \neq \boldsymbol{0}$ genau dann, wenn der Vektor $\boldsymbol{u}_1$ den Zeitverlauf des Vektors $\boldsymbol{y}_2$ beeinflußt. Ist nun außerdem $\boldsymbol{C}_1(\lambda \boldsymbol{I} - \boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{B}_2 \neq \boldsymbol{0}$ und stellt der Teilregler $i = 2$ z. B. ein vollständig steuerbares und beobachtbares dynamisches System dar, so ist mit der Einstellung dieses Teilreglers die Gewährleistung des Entwurfsziels des zuvor angeschlossenen Teilreglers $i = 1$ im nachhinein in Frage gestellt.

Aus den oben genannten Gründen wird im weiteren die Matrixübertragungsfunktion als Beschreibungsform der Wechselwirkungen zwischen den Teilreglern durch eine graphentheoretische ersetzt. Mit dem Zeilenvektor $\boldsymbol{e}_l = [e_l^1, e_l^2, \ldots, e_l^n]$, wobei $e_l^j = \begin{cases} 1 & l = j \\ 0 & l \neq j \end{cases}$, ergibt sich für die j-te Differentialgleichung im System (1) die Beziehung

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}x^j(t) = a_{jj}x^j(t) + \sum_{k \neq j} a_{jk}x^k(t) + \sum_{i \in \boldsymbol{N}} \boldsymbol{e}_j \boldsymbol{B}_i \boldsymbol{u}_i(t).$$

Falls $a_{jl} \neq 0$, wird der Zeitverlauf von x^j somit durch x^l ($l \neq j$) beeinflußt. Aufbauend auf diese Überlegung sei nun ein Graph $\boldsymbol{G}$ definiert. Die Knoten des Graphen werden repräsentiert durch die n (skalaren) Zustandsgrößen x^l ($l = 1, 2, \ldots, n$), die N Vektoren der Eingangsgrößen $\boldsymbol{u}_i$ und die N Vektoren der Ausgangsgrößen $\boldsymbol{y}_i$. Es existiere nun ein orientierter Zweig vom Knoten x^j zum Knoten x^l genau dann, wenn $a_{lj} \neq 0$. Enthält die l-te Zeile von $\boldsymbol{B}_i$ wenigstens ein nicht identisch verschwindendes Element, so existiere ein Zweig vom Knoten $\boldsymbol{u}_i$ zum Knoten $\boldsymbol{x}^l$. Ebenso existiere dann und nur dann ein Zweig vom Knoten $\boldsymbol{x}^l$ zum Knoten $\boldsymbol{y}_i$, wenn die l-te Spalte von $\boldsymbol{C}_i$ keinen Nullvektor darstellt. Unter einem Pfad sei eine Aneinanderreihung solcher orientierter Zweige zu verstehen (Bild 1).

Die graphentheoretische Beschreibungsform und die durch die Matrixübertragungsfunktion des Systems

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{x}(t) = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(t) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(t), \quad \boldsymbol{y}(t) = \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(t),$$

kurz: $(\boldsymbol{C}, \boldsymbol{A}, \boldsymbol{B})$, stehen damit in folgendem Zusammenhang:

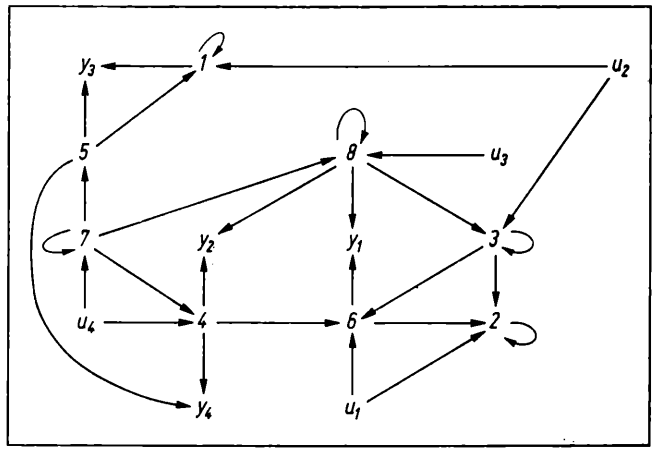


Bild 1. Graph G mit den Knoten l ($l = 1, \ldots, 8$) für die Zustandsgrößen, u_i und y_i ($i = 1, \ldots, 4$) für die Eingangs- und Ausgangsvektoren (s. Beispiel Abschn. 6.)

Lemma 1: Ist die Matrixübertragungsfunktion von $(\boldsymbol{C}, \boldsymbol{A}, \boldsymbol{B})$ verschieden von der Nullmatrix, so existiert ein Pfad von $\boldsymbol{u}$ nach $\boldsymbol{y}$.

Lemma 2: Das System $(\boldsymbol{C}, \boldsymbol{A}, \boldsymbol{B})$ sei vollständig steuerbar und $l \in \{1, 2, \ldots, n\}$ fixiert. Dann existiert ein Pfad von $\boldsymbol{u}$ nach $\boldsymbol{x}^l$.

Die Umkehrung der Aussage von Lemma 1 macht eine Klassifizierung der Systeme nach ihrer Struktur erforderlich. Mit der Auflistung aller Elemente der Matrizen $\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B}_i, \boldsymbol{C}_i$, $(i \in \boldsymbol{N})$ in geordneter Reihenfolge kann $\boldsymbol{p} = (\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B}_1, \ldots, \boldsymbol{B}_N, \boldsymbol{C}_1, \ldots, \boldsymbol{C}_N)$ als ein Punkt eines $n \times \left(n + \sum_{i \in \boldsymbol{N}} (m_i + r_i)\right)$-dimensionalen Raumes betrachtet werden. Man sagt, das System (1) hat die gleiche Struktur wie ein anderes System $(\overline{\boldsymbol{C}}_i, \overline{\boldsymbol{A}}, \overline{\boldsymbol{B}}_i, \boldsymbol{N})$ mit gleichen Matrixformaten, wenn genau die Koordinaten des Punktes $\overline{\boldsymbol{p}} = (\overline{\boldsymbol{A}}, \overline{\boldsymbol{B}}_1, \ldots, \overline{\boldsymbol{B}}_N, \overline{\boldsymbol{C}}_1, \ldots, \overline{\boldsymbol{C}}_N)$ Null (verschieden von Null) sind, deren entsprechende Koordinaten in $\boldsymbol{p}$ Null (verschieden von Null) sind. Im folgenden soll untersucht werden, inwieweit die gleiche Struktur zweier Systeme sich in gleichen Eigenschaften der Systeme widerspiegelt.

$\boldsymbol{R}^q$ bezeichne einen reellen q-dimensionalen Vektorraum. $f(p_1, \ldots, p_q)$ sei ein Polynom von q Veränderlichen mit reellen Koeffizienten. Die Menge aller Punkte $\boldsymbol{p} = (p_1, \ldots, p_q)$ mit $f(p_1, \ldots, p_q) = 0$ bildet eine Hyperebene $\boldsymbol{V}(f)$. Der Schnitt einer endlichen Anzahl von Hyperebenen wird Mannigfaltigkeit genannt. Eine Eigenschaft gilt nun für „fast alle" Elemente $\boldsymbol{p} \in \boldsymbol{R}^q$, wenn ein Polynom f und damit eine Hyperebene $\boldsymbol{V}(f)$ existiert, so daß die Eigenschaft für alle $\hat{\boldsymbol{p}} \notin \boldsymbol{V}(f)$ gilt. Offensichtlich stellt $\boldsymbol{V}(f)$ eine geschlossene Menge in bezug auf die Euklidische Metrik dar. Gilt eine Eigenschaft für ein $\hat{\boldsymbol{p}} \notin \boldsymbol{V}(f)$, so existiert eine Umgebung $\boldsymbol{U}(\hat{\boldsymbol{p}})$, daß die Eigenschaft auch für alle $\boldsymbol{p} \in \boldsymbol{U}(\hat{\boldsymbol{p}})$ gilt. Gilt es nun einen Punkt $\boldsymbol{p} = (\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B}, \boldsymbol{C})$ mit

$$\boldsymbol{C}(\lambda \boldsymbol{I} - \boldsymbol{A})^{-1}\boldsymbol{B} \neq \boldsymbol{0}, \tag{3}$$

so wird diese Beziehung von fast allen Punkten, die Systeme gleicher Struktur repräsentieren, erfüllt.

Lemma 3: Wenn ein Pfad von $\boldsymbol{u}$ nach $\boldsymbol{y}$ existiert, so ist für fast alle Systeme $(\boldsymbol{C}, \boldsymbol{A}, \boldsymbol{B})$ mit der gleichen Struktur die Matrixübertragungsfunktion verschieden von der Nullmatrix.

Der einzige Unterschied zwischen den beiden Beschreibungsformen besteht somit darin, daß die graphentheoretische Form sämtliche Nullen der Matrixübertragungsfunktion, die auf arithmetischen und nicht Booleschen Operationen basieren und folglich an die momentanen Werte der nichtverschwindenden Matrizenelemente von $(\boldsymbol{C}, \boldsymbol{A}, \boldsymbol{B})$ gebunden sind, als vorhandene Kopplungen zwischen den Eingangs- und Ausgangsgrößen interpretiert.

2. Zerlegung in Teilsysteme

Aus dem Graph G läßt sich einfach ein reduzierter Graph $\tilde{G}$ ableiten, der mit den Paaren (u_i, y_i) nur insgesamt N Knoten aufweist. Vom Knoten i zum Knoten j ist ein orientierter Zweig genau dann einzutragen, wenn im Graphen G ein Pfad von u_i zu y_j existiert (Bild. 2) Ein System (1) heißt nun nicht zerlegbar, wenn der zugehörige Graph $\tilde{G}$ zyklisch ist. Diese Charakteristik eines Systems ist offenbar allein von der Struktur des Systems und nicht von den genauen Werten der Matrizenelemente abhängig.

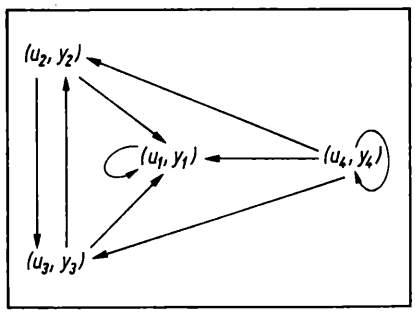


Bild 2. Reduzierter Graph $\tilde{G}$, erhalten aus G für Bild 1

Es sei nun der Fall betrachtet, daß sich die Nummern der Teilregler in zwei Indexmengen N_1, N_2 erfassen lassen, die beide wenigstens ein Element (Index) haben, für die $N_1 \cup N_2 = N$, $N_1 \cap N_2 = 0$ gilt, und so daß von keinem u_i ($i \in N_1$) ein Pfad zu irgendeinem y_j ($j \in N_2$) existiert. In einem solchen Fall (und nur in einem solchen Fall) läßt sich eine Koordinatenpermutation derart finden, daß

$$PAP^T = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & A_{22} \end{bmatrix}; \quad PB_i = \begin{bmatrix} \tilde{B}_i \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$PB_j = \begin{bmatrix} \hat{B}_j \\ \tilde{B}_j \end{bmatrix} \qquad \begin{aligned} C_i P^T &= [\tilde{C}_i, \hat{C}_i] \\ C_j P^T &= [0, \tilde{C}_j] \end{aligned}.$$

Damit zerfällt das Problem der Eigenwertverschiebung für das System (1) in ein solches für die Teilsysteme $(\tilde{C}_i, A_{11}, \tilde{B}_i, N_1)$ und $(\tilde{C}_i, A_{22}, \tilde{B}_i, N_2)$. Das System (1) war hier nicht zyklisch. Ist eins der entstandenen Teilsysteme ebenfalls nicht zyklisch, so kann für dieses eine ähnliche Permutationsmatrix gefunden werden. Offenbar gibt es für das System (1) stets eine Permutation und somit eine Darstellung als Gesamtheit von t nicht zerlegbaren Teilsystemen. Welche Paare (u_i, y_i) von Eingangs/Ausgangsvektoren welchem Teilsystem zuzuordnen sind, kann einfach ermittelt werden (s. Abschn. 4.). Als Ergebnis erhält man die Indexmengen N_k mit

$$N_0 \cup \bigcup_{k=1}^{t} N_k = N, \qquad N_0 \cap \bigcap_{k=1}^{t} N_k = 0. \tag{4}$$

Hierbei erfaßt N_0 alle die Indizes, für die gilt: Das Paar (u_i, y_i) gehört keinem einzigen Zyklus in $\tilde{G}$, bestehend aus mehreren Knoten, an, und es existiert auch kein Pfad in G von u_i zu y_i (Pfad entspricht Selbstschleife in $\tilde{G}$).

Betrachtet man nur die orientierten Zweige in G, die einen Zyklus mit einem anderen verbinden, so erhält man Aufschluß über die Einflußnahme eines Teilreglers auf einen zu einem anderen Zyklus gehörigen (stets ohne Rückwirkung). Die Zuordnung der Zustandsgrößen x^l zu den Teilsystemen und damit deren Dimension sind nicht eindeutig bestimmt. Allein die nichtfesten Modi vom System (1) sind den Teilsystemen eindeutig zugeordnet. Enthält das k-te Teilsystem z. B. ein x^l, das keinem einzigen Pfad angehört, der ein u_i mit einem y_j ($i, j \in N_k$) verbindet, so ist nach Lemma 2 das Teilsystem nicht vollständig (zentral) steuerbar und gleichzeitig (zentral) beobachtbar. Derartige Zustandsgrößen x^l entsprechen folglich festen Modi und sind vor Ausführung der Eigenwertverschiebung aus dem Teilsystem zu „entfernen". (Dies betrifft x^2 und x^3 des Beispiels). Es ist also sinnvoll, von Anfang an bei der Aufstellung der Teilsysteme nur die x^l zu erfassen, die wenigstens einem Pfad angehören, der ein u_i mit einem y_j verbindet, wobei i und j aus der gleichen Indexmenge N_k sind. Folglich trägt für $i \in N_0$ der i-te Teilregler nicht zur Eigenwertverschiebung bei. Die entsprechenden Permutationsmatrizen P_k ($k = 1, \ldots, t$) werden unten angegeben.

3. Dezentrale Eigenwertverschiebung

Die Beziehung (3) und ihre Verallgemeinerung auf t Teilsysteme veranschaulichen, daß für die durch die N Teilregler geschlossenen Teilsysteme gilt: Das Spektrum des geregelten Systems (1) ist gleich der Vereinigung der Spektren aller Teilsysteme.

Für jede nicht einelementige Indexmenge N_k besteht bisher noch die Schwierigkeit einer dezentralen Eigenwertverschiebung weiterhin. Ist allerdings das Teilsystem nicht zerlegbar, so kann bei Sicherstellung gewisser schwacher Voraussetzungen die Eigenwertverschiebung bereits unter Verwendung eines einzigen (willkürlich herausgegriffenen) Teilreglers (2) ausgeführt werden. Zuvor wird noch eine dezentrale konstante Ausgangsrückführung

$$u_i(t) = H_i y_i(t) \tag{5}$$

vorgenommen, wodurch alle Eingänge der Regelstrecke belegt sind. Es ergibt sich damit eine Systemmatrix $A_H = A + \sum_{i=1}^{N} B_i H_i C_i$ für das Gesamtsystem bzw. entsprechende Matrizen für die Teilsysteme. Ohne Einschränkung der Allgemeingültigkeit werden nachfolgende Erörterungen für das Gesamtsystem angeführt.

Es eröffnet sich die Frage, ob die Eigenschaft der Nichtzerlegbarkeit des Systems (1) auf das System (C_i, A_H, B_i, N) übertragen werden kann, denn letzteres bildet die Grundlage für eine Eigenwertverschiebung.

Lemma 4: Das System (1) ist genau dann nicht zerlegbar, wenn das System (C_i, A_H, B_i, N) nicht zerlegbar ist.

Es bezeichne $\sigma(A)$ das Spektrum von A, $\Lambda_0 = \bigcap_{H_1, \ldots, H_N} \sigma(A_H)$ die Menge der festen Modi [5] des Systems (1) und $\Lambda_H^i = \bigcap_{K_i} \sigma(A_H + B_i K_i C_i)$ die Menge der durch den i-ten Teilregler aus (5) nicht verschiebbaren Eigenwerte.

Hauptresultat: Gegeben sei ein nicht zerlegbares System (C_i, A_H, B_i, N) mit $B_i \neq 0, C_i \neq 0$. Dann gilt für fast alle Systeme mit der gleichen Struktur und für fast alle dezentralen Regler (5) die Beziehung $\Lambda_0 = \Lambda_H^i$ ($i \in N$).

Es sei M_H eine Matrix, deren Elemente algebraisch von einer Reglermatrix H abhängen. Gilt nun Rang $M_H \geqq q$ für wenigstens ein H, so gilt dies offensichtlich damit für fast alle H. So wird z. B. der größtmögliche Rang von $(A_H/B_i) = [B_i, A_H B_i, \ldots, A_H^{n-1} B_i]$, der durch die Auswahl von H erreicht werden kann, für fast alle H angenommen. Aus [1, Theorem 4] kann der folgende Satz abgeleitet werden.

Satz: Gegeben sei ein System (C_i, A_H, B_i, N) mit $B_i \neq 0$, $C_i \neq 0$, wobei die Matrizen (A_H/B_i) und (A_H^T/C_i^T) für alle i größtmöglichen Rang bezüglich H haben. Für alle echten Teilmengen $Q \subset N$ sei außerdem $C_Q(\lambda I - A)^{-1} B_{N \setminus Q} \neq 0$. Dann gilt $\Lambda_0 = \Lambda_H^i$ für alle $i \in N$ [2]).

Folgerung: Gegeben sei eine bezüglich der reellen Achse symmetrische Teilebene $\mathbb{C}^*$ der komplexen Ebene und ein dezentraler Regler, für den das Spektrum des geschlossenen Systems in $\mathbb{C}^*$ enthalten ist. Sind die im Satz genannten Bedingungen er-

[2]) Für die Indexmenge $M = \{i_1, i_2, \ldots, i_q\}$ N sei $N \setminus M$ die Ergänzungsmenge und $B_M = [B_{i_1}, B_{i_2}, \ldots, B_{i_q}]$.

füllt, so existiert für jedes fixierte $i \in N$ ein Teilregler (2), für den das Spektrum des allein durch diesen Teilregler geregelten Systems (C_1, A_H, B_1, N) ebenfalls in $\mathfrak{C}^*$ liegt.

Die Folgerung beruht auf der Aussage: Ist ein Eigenwert durch konstante (zentrale bzw. dezentrale) Ausgangsrückführung verschiebbar, so kann er durch eine dynamische (zentrale bzw. dezentrale) Ausgangsrückführung beliebig verschoben werden [5].

Aus dem Satz leitet sich das Hauptresultat ab. Mit „fast alle Systeme" sind dabei alle nicht zerlegbaren Systeme erfaßt mit Ausnahme der Systeme, deren Matrixübertragungsfunktion $C_Q(\lambda I - A)^{-1} B_{N \setminus Q}$ für irgendeine echte Teilmenge Q verschwindet.

4. Ausführung der Zerlegung

Für das System (1) ist der Graph G aufzustellen. Die Knoten u_l und y_l ($l \in N$) des Graphen G seien zu einem Knoten (u_l, y_l) zusammengefaßt, der mit $n + l$ numeriert werde, während die Zustandsgrößen x^r die Nummern r ($r = 1, 2, \ldots, n$) tragen sollen. Für eine $(n + N, n + N)$-Matrix $S = [s_{ij}]$ wird $s_{ij} = 1$ gesetzt, wenn ein Zweig vom Knoten j zum Knoten i existiert. Anderenfalls sei $s_{ij} = 0$ $(i, j = 1, 2, \ldots, n + N)$. Die Matrix $S^* = [s_{ij}^*]$ ergebe sich aus $S^* = S + S^2 + \ldots + S^{n+N}$. Durch die Festlegung $q_{ij} = s_{ij}^* \cdot s_{ji}^*$ entsteht eine symmetrische Matrix $Q = [q_{ij}]$. Zwei Knoten i und j gehören nun nach [2] genau dann ein und demselben Zyklus an, wenn $q_{ij} \neq 0$. Ist unter den Knoten eines Zyklus wenigstens einer mit $l > n$, so repräsentiert dieser Zyklus ein Teilsystem k ($k = 1, 2, \ldots, t$). Die Nummern aller Knoten $l > n$ dieses Zyklus bilden die Indexmenge N_k. Mit $A_k = P_k A P_k^T$, $B_i^k = P_k B_i$, $C_i^k = C_i P_k^T$ für $i \in N_k$ ist das Teilsystem (C_i^k, A_k, B_i^k, N_k) gefunden. Hierbei ist P_k eine Matrix, gebildet aus allen Zeilenvektoren e_r, für die x^r Zustandsgröße des k-ten Teilsystems ist.

Besteht ein Zyklus nur aus Knoten l mit $l \leqq n$, so gehört x^l (im Unterschied zu den eben beschriebenen Zyklen) keinem Pfad von irgendeinem u_i zu irgendeinem y_j (i, j — Elemente der gleichen Indexmenge) an. Aus allen Zeilenvektoren e_j, für die l einen derartigen Knoten darstellt oder der Knoten l keinem einzigen Zyklus angehört, wird die Matrix P_0 gebildet. Das Spektrum von $P_0 A P_0^T$ gehört der Menge der festen Modi an. Alle Knoten $i > n$, die keinem Zyklus angehören, werden durch N_0 erfaßt. Letztere bewirken keine Eigenwertverschiebung.

5. Robustheit des Verfahrens

Die Zerlegungsvorschrift setzt allein voraus, daß keines der nicht als Null fixierten Matrizenelemente identisch verschwindet. Belegt man diese Elemente für die Eigenwertverschiebung mit konkreten Zahlenwerten, so ändern sich die Eigenwerte stetig mit den Parameterschwankungen. Somit existiert mit jedem konkreten Zahlenwert für die Matrizenelemente eine Umgebung (Epsilonabweichung), in der die Stabilität des geregelten Systems gewährleistet bleibt.

6. Beispiel

$$
\begin{aligned}
C_1 &= [0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; c_{16} \;\; 0 \;\; c_{18}] \\
C_2 &= [0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; c_{24} \;\; 0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; c_{28}] \\
C_3 &= [c_{31} \;\; 0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; c_{35} \;\; 0 \;\; 0 \;\; 0] \\
C_4 &= [0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; c_{44} \;\; c_{45} \;\; 0 \;\; 0 \;\; 0] \\
B_1 &= [0 \;\; b_{12} \;\; 0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; b_{16} \;\; 0 \;\; 0]^T \\
B_2 &= [b_{21} \;\; 0 \;\; b_{23} \;\; 0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; 0]^T \\
B_3 &= [0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; b_{38}]^T \\
B_4 &= [0 \;\; 0 \;\; 0 \;\; b_{44} \;\; 0 \;\; 0 \;\; b_{47} \;\; 0]^T
\end{aligned}
$$

Außerdem seien folgende Elemente der Systemmatrix A verschieden von Null: a_{11}, a_{15}, a_{22}, a_{23}, a_{26}, a_{33}, a_{38}, a_{47}, a_{57}, a_{63}, a_{64}, a_{77}, a_{87}, a_{88}.

Aus den Graphen G (Bild 1) und $\tilde{G}$ (Bild 2) ergibt sich

$$
N_1 = \{4\},\; N_2 = \{1\},\; N_3 = \{2, 3\} \cdot P_1 = \begin{bmatrix} e_4 \\ e_7 \\ e_5 \end{bmatrix},\; P_2 = [e_6],
$$

$$
P_3 = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_8 \end{bmatrix},\; C_1^2 = [c_{16}],\; C_2^2 = [0, c_{28}],\; C_3^2 = [c_{31}, 0],
$$

$$
C_4^1 = [c_{44}, 0, c_{45}],\; B_1^2 = [b_{16}],\; B_2^2 = [b_{21}, 0]^T,
$$

$$
B_3^2 = [0, b_{38}]^T,\; B_4^1 = [b_{44}, b_{47}, 0]^T
$$

$$
A_1 = \begin{bmatrix} 0 & a_{47} & 0 \\ 0 & a_{77} & 0 \\ 0 & a_{57} & 0 \end{bmatrix},\quad A_2 = [0],\quad A_3 = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 \\ 0 & a_{88} \end{bmatrix}.
$$

Für $H_2 \neq 0$, $H_3 \neq 0$ und beliebige H_1, H_4 sind die Steuerbarkeits- und Beobachtbarkeitsmatrizen von größtmöglichem Rang.

7. Zwei Kategorien von festen Modi

Zur Eigenwertverschiebung wird nur an ein Paar (u_l, y_l) des nicht zerlegbaren Systems ein Teilregler angeschlossen. Damit sind die Begriffe der nichtsteuerbaren und nichtbeobachtbaren Eigenwerte erklärt. Bei der Zerlegung wurden in oben angeführtem Beispiel nur die Zustandsgrößen berücksichtigt, die auf einem Pfad von irgendeinem u_i zu irgendeinem y_j liegen, wobei i und j hierbei der gleichen Indexmenge N_k angehören. (Die Vernachlässigung der übrigen Zustandsgrößen wurde bereits begründet.) Wird nun das Format des Teilsystems mit n_k bezeichnet, gilt nach [3] und [4]:

Fast alle (Teil-)Systeme (C_i^k, A_k, B_i^k) gleicher Struktur sind vollständig steuerbar, wenn für wenigstens eins von ihnen die Beziehung Rang $[A_k, B_i^k] = n_k$ erfüllt wird (vgl. Teilsystem 1). Eine analoge Aussage kann für die Beobachtbarkeit formuliert werden.

Gemäß dem Hauptresultat besteht damit für fast alle nicht zerlegbaren Systeme die Menge der festen Modi aus allein dem (möglicherweise mehrfachen) Eigenwert Null. Andere in einem konkreten Modell eines nichtzerlegbaren Systems vorkommende feste Modi sind auf bestimmte Systemparameterwerte beschränkt, treten also nur auf, wenn zwischen den Parametern Beziehungen in Form von fixierten algebraischen Gleichungen beschreibbar sind. Letztere werden allerdings für fast alle Systeme gleicher Struktur nicht erfüllt.

Eine zweite Kategorie von festen Modi wird durch das Spektrum von $P_0 A P_0^T$ erfaßt. Hier existiert eine eindeutige Zuordnung zwischen je einem Eigenwert und je einer Zustandsgröße x^l, die keinem einzigen Pfad von irgendeinem u_i zu irgendeinem y_j ($i, j \in N_k$) angehört. Die Zuordnung ist invariant in bezug auf einen dezentralen Regleranschluß.

8. Bemerkungen

Bei allen vorausgegangenen Erörterungen fand der Sachverhalt, daß bei einer Reihe von Zustandsmodellen die Matrizen der meßbaren Ausgangsgrößen exakt angebbar sind, keine Berücksichtigung. Es kann gezeigt werden, daß Lemma 3, Lemma 4 und das Hauptresultat ihre Gültigkeit behalten, wenn die Ausgangsmatrizen beliebig festgelegt werden und der Ausdruck „für fast alle Systeme" durch „für fast alle Matrizen A, B_1, ..., B_N" gleicher Struktur ersetzt wird.

Zusammenfassung

Für das System (1) wurde eine Zerlegungsvorschrift in Teilsysteme angegeben, die unabhängig voneinander stabilisiert werden können. Dafür müssen allein alle identisch verschwin-

(Fortsetzung auf Seite 325)

Doz. Dr. sc. techn. *H. Reinhardt*, Freiberg[1])

Dedizierte Prozeßdatensimulation — ein Beitrag zur Programmentwicklung auf Testprozeßrechnern

IA 4.0.5.2.

0. Einleitung

Prozeß- und Mikrorechner erhalten als speicherprogrammierbare Automatisierungsmittel ihre jeweilige Funktion durch ein System von Anwenderprogrammen. Die Kostenrelation zwischen der Entwicklung der Anwenderprogramme und der Gerätetechnik verschiebt sich mit der Preisdegression mikroelektronischer Schaltkreise immer deutlicher zur programmtechnischen Seite. Dieser Trend wird zusätzlich durch die hohen Anforderungen an die Software-Zuverlässigkeit, -Handhabbarkeit und -Wartungsfähigkeit verstärkt. In der Praxis werden sowohl die veranschlagten Kosten als auch die geplante Zeit für die Fertigstellung der Anwenderprogramme oft erheblich überschritten [1] bis [6].

Der Beitrag will auf eine Möglichkeit zur Programmentwicklung unter erweiterter Nutzung eines Testprozeßrechners hinweisen.

1. Problematik

Die im internationalen Maßstab sehr umfangreichen Bestrebungen zur Schaffung von Verfahren und Methoden, die die rationelle Entwicklung zuverlässiger Anwenderprogramme für Prozeß- und Mikrorechner gestatten, lassen sich drei Komplexen zuordnen.

1. Übergang zur problemorientierten Programmierung

   Hier konzentrieren sich die Bemühungen nicht nur auf die Schaffung höherer Programmiersprachen, wie in [7] bis [16], sondern auch auf Mehrebenensprachen [17] und [18] und die Entwicklung von Modularsystemen [19] bis [22] sowie von Formular- und Konsolsystemen [23] bis [26].

2. Rationalisierung der Testarbeiten

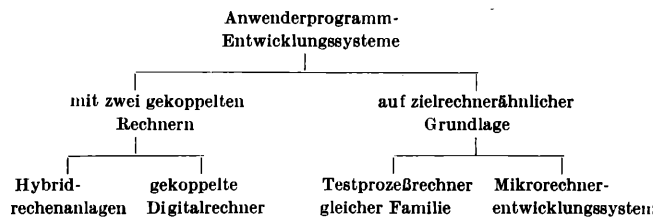
   Neben den bekannten Prinzipien, Methoden und Hilfsmitteln [27] stehen die Probleme des „Systemtests" (Berücksichtigung der On-line-Prozeßdatenverarbeitung im Echtzeitbetrieb) im Vordergrund [28] bis [32].

3. Verbesserung der gerätetechnischen Basis

   Hier sind Rechenanlagen zu nennen, die den interaktiven Testbetrieb gestatten [33]. Typisch ist der Übergang auf Fremdrechner. Es kommen Wirtsrechner und in zunehmendem Maße Entwicklungssysteme (Tafel 1) zum Einsatz [34], bei denen wiederum die digitalen Doppelrechnersysteme die besten Arbeitsmöglichkeiten bieten [35] bis [37]. Hierzu zählen auch die Mikrorechner-Entwicklungssysteme mit angekoppeltem Zielrechner [8].

In der Praxis muß der Programmieringenieur aber häufig noch mit der Gerätetechnik auskommen, die in Tafel 1 auf der rechten Seite dargestellt ist. Dort sind Mikrorechner-Entwicklungssysteme (mit einem Prozessor) und Testprozeßrechner gleicher Familie zusammengefaßt worden, da zwischen ihnen hinsichtlich der gerätetechnischen Ausstattung und des Komforts der Systemsoftware deutliche Parallelen bestehen [38]. Solche Entwicklungssysteme auf zielrechnerähnlicher Grundlage haben i. allg. eine Prozeßkopplungseinheit (bzw. E/A-Module), die sich aber von der des Zielrechners unterscheidet. Damit ist zwar ein Systemtest prinzipiell durchführbar, jedoch nicht mit den

Tafel 1. Übersicht zu Entwicklungssystemen



für den Zielrechner geschriebenen Anwenderprogrammen, da diese einen anderen Befehlsvorrat für die Bedienung der Prozeßperipherie aufweisen.

Um den Test der unveränderten Zielrechnerprogramme auf dem zielrechnerähnlichen Entwicklungssystem doch zu ermöglichen, müßten Methoden der Emulation, Simulation oder Transformation von Programmen [39] und [40] angewendet werden. Diese sind aber aufwendig und bei Eingriffen in die Hardware und/oder Systemsoftware auch nicht unproblematisch in der Handhabung. Andere Verfahren lassen nur eine Vorabtestung zu bzw. nehmen Modifikationen der Zielrechnerprogramme in Kauf [41] und [42].

Im folgenden wird ein Verfahren vorgestellt, das vom einzelnen Anwender beherrschbar ist und bei Erfüllung der Eignungsbedingungen zu gut ausgetesteten Programmen führt.

2. Verfahren der dedizierten Prozeßdatensimulation

2.1. *Voraussetzungen*

- Der Zielprozeßrechner steht für die Programmentwicklung nicht zur Verfügung (Routinebetrieb anderer Programme bei nicht möglichem Hintergrundbetrieb u. ä.).
- Der Testprozeßrechner hat im Vergleich mit dem Zielprozeßrechner
  . die gleiche Zentraleinheit
  . eine gleichwertige DV-Peripherie und Systemsoftware
  . eine andere Prozeßkopplungseinheit.
- Das zu entwickelnde Anwenderprogrammsystem soll ohne Änderung auf dem Zielprozeßrechner einsatzfähig sein.
- Eingriffe in die Hardware und Systemsoftware des Test- und des Zielprozeßrechners werden ausgeschlossen.

2.2. *Prinzip*

Beim Einsatz eines Testprozeßrechners im Inselbetrieb scheiden die Möglichkeiten der Prozeßsimulation oder der universellen Prozeßdatensimulation aus. Es wird deshalb eine dedizierte Lösung der Prozeßdatensimulation angestrebt, die

- auf hardware- und softwareseitigen Komponenten beruht
- den Gegebenheiten des Testprozeßrechners (speziell der Prozeßkopplungseinheit) Rechnung trägt
- die Eigenschaften des zu testenden Programmsystems (speziell die Eingangs- und Ausgangsgrößen) berücksichtigt.

Für den Prozeßdatenaustausch mit dem Programmsystem wird eine Software-Schnittstelle festgelegt. Diese ist im Bild 1 als PRODA-Feld (Prozeßdatenfeld) bezeichnet. Dieser Common-Bereich dient zugleich der programmsysteminternen Kommunikation und kann z. B. bei den Prozeßrechnern der Familie R 4000/4200 mit dem Bereich gemeinsamer Basis (BGB) realisiert werden.

[1]) Mitteilung aus der Bergakademie Freiberg, WB Elektrotechnik und Automatisierung der Sektion Maschinen- und Energietechnik.

Der mit „freier Bereich" bezeichnete Teil des Arbeitsspeichers enthält beim Zielprozeßrechner die Programme zur Meßwerterfassung und Steuerwertausgabe. Beim Testprozeßrechner bildet er die Grundlage für das Verfahren der dedizierten Prozeßdatensimulation, das aus zwei Teilen besteht.

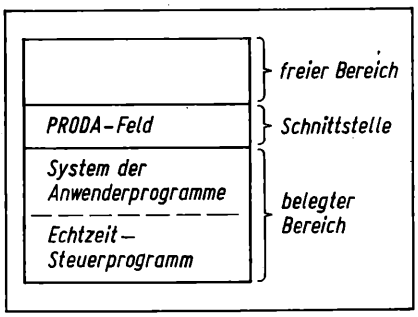


Bild 1. Arbeitsspeicherbelegung des Testprozeßrechners

2.3. *Teilverfahren*

Das im Bild 2 prinzipiell dargestellte Verfahren lehnt sich mit der Zweiteilung an die grundsätzliche Methodik der Testung von Anwenderprogrammen für rechnerautomatisierte Systeme an. Das erste Teilverfahren beschränkt sich gerätetechnisch auf die Datenverarbeitungsperipherie des Testprozeßrechners. Die dabei in [43] entwickelte Besonderheit besteht in der symbolisch adressierten Ein- und Ausgabe der Testwerte. Damit wird ein sinnfälliger Bezug bei der Programmtestung hergestellt und die Voraussetzung zur eindeutigen Protokollierung bei fehlerfreier Zuordnung von Testgröße und Testwert geschaffen.
Die praktische Anwendbarkeit hängt wesentlich vom erreichbaren Grad der Aufwandsverringerung bei der Generierung der testobjektspezifischen Testprogramme ab. Dies wird ermöglicht durch

- die modulgestützte Generierung der Testprogramme (Anwendung des Modularprinzips) oder
- die halbautomatische Generierung der Testprogramme (Anwendung des Generatorprinzips) [43].

Die Zielstellung für das zweite Teilverfahren besteht darin, die unveränderten Zielrechnerprogramme auf dem Testprozeßrechner einer simulierten On-line-Testung zu unterziehen. Da ohne Verwendung eines Zweitrechners die Echtzeitforderungen nur bedingt eingehalten werden können, muß einschränkend von einem modifizierten Systemtest bzw. einer betriebszustandsnahen Testung gesprochen werden.
Die On-line-Prozeßdatensimulation erfordert spezielle hard- ware- und softwareseitige Entwicklungen. Ein als Prozeßdatensimulator bezeichnetes Gerät ermöglicht die unmittelbare Ein- und Ausgabe der aktuellen Werte für die Prozeßgrößen. Der Prozeßdatensimulator wird mit Hilfe spezieller Eingabe- und Ausgabeprogramme mit dem Prozeßdatenfeld und somit mit dem zu testenden System der Anwenderprogramme gekoppelt [38].

2.4. *Eignungsbedingungen*

Das Verfahren ist einsetzbar für die Testung von Anwenderprogrammen mit folgenden Merkmalen.

- Die Anzahl der Prozeßgrößen ist gering.
- Die Prozeßeingabe-/-ausgabesignale weisen vorwiegend diskreten Charakter auf und sind im Rahmen der Testung vielfältig zu variieren.
- Die Echtzeitbedingungen sind entweder von untergeordneter Bedeutung oder vom Menschen als „Prozeßsimulator" erfüllbar.

Die Zielstellung und die Realisierung ist für beide Teilverfahren zusammenfassend in Tafel 2 dargestellt. Das Verfahren ist vom Prinzip her auch zur Unterstützung der logischen Testung von Mikrorechnerprogrammen mit Hilfe von Entwicklungssystemen oder Mikrorechner-Arbeitsplätzen geeignet.

3. Anwendungsbeispiel

3.1. *Aufgabenstellung*

Die Realisierbarkeit des Verfahrens wurde im Rahmen der Entwicklung eines Programmsystems zur automatischen Steuerung der baggerseitigen Fahrbewegungen einer 60-m-Abraumförderbrücke praktisch erprobt. Der Prozeßsteuerung liegt eine in der Kohleindustrie neuentwickelte Technologie für Förderbrücken mit zweiseitiger Baggeranordnung zugrunde [44] und [45]. Das zu testende Programmsystem SEBL (Strossenendbetrieb linkes

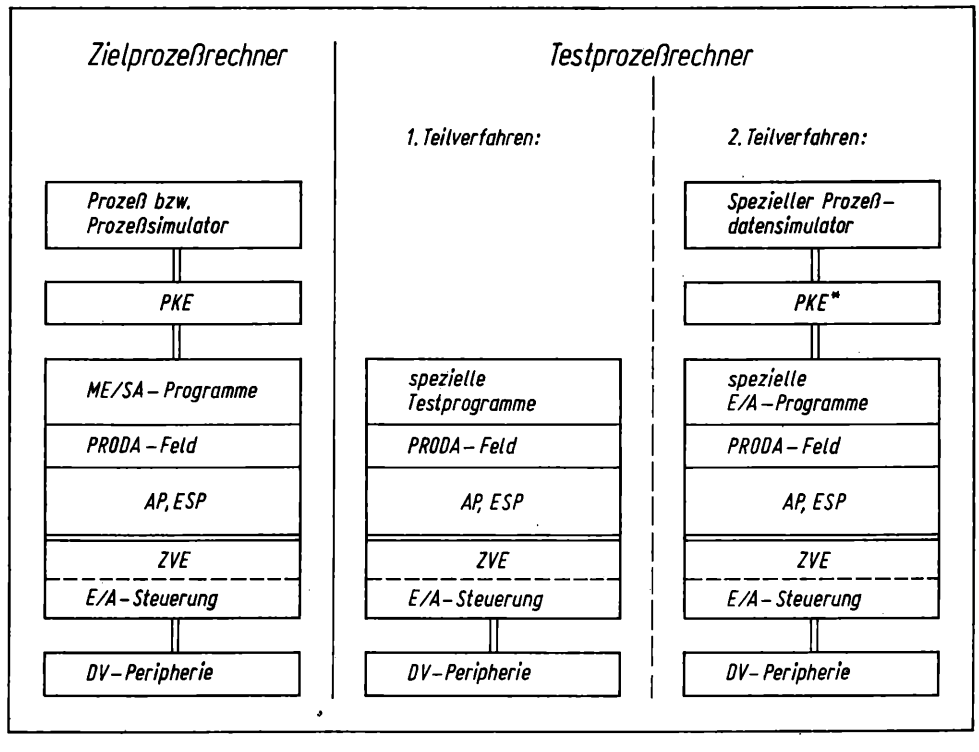


Bild 2. Prinzipielle Darstellung des Verfahrens der dedizierten Prozeßdatensimulation

PKE, PKE* Prozeßkopplungseinheiten; ME/SA Meßwerterfassung/Steuerwertausgabe; AP, ESP Anwenderprogramme, Echtzeit-Steuerprogramm; ZVE Zentrale Verarbeitungseinheit; E/A Ein/Ausgabe; DV Datenverarbeitungsgeräte

	1. Teilverfahren	2. Teilverfahren
Testprinzip	Programmtest (Off-line-Betrieb)	modifizierter Systemtest (simulierter On-line-Betrieb)
Gerätetechnische Grundlage	DV-Peripherie des Testprozeßrechners	PKE* und DV-Peripherie des Testprozeßrechners
Zielstellung	logische Fehlerfreiheit der Anwenderprogramme	Funktionsnachweis der automatischen Steuerung
notwendige Testhilfsmittel	spezifische Programme zur Testwertein- und -ausgabe	Prozeßdatensimulator mit zugehörigen Eingabe- und Ausgabeprogrammen
Entwicklung der Testhilfsmittel	modulgestützte Generierung; halbautomatische Generierung	Entwicklung des Prozeßdatensimulators; Entwicklung der Eingabe/Ausgabeprogramme
Ergebnis	Testlaufprotokolle für ausgewählte Testdatensätze	praktische Erprobung der automatischen Steuerung unter betriebsähnlichen Bedingungen

Tafel 2. Zusammenfassende Darstellung des Verfahrens der dedizierten Prozeßdatensimulation

Strossenende) besteht aus mehreren Einzelprogrammen und einer Reihe von Unterprogrammen [46] und [47].
Seine automatisierungstechnische Funktion ist als komplizierte Steuerung zu charakterisieren, die vielfältige Berechnungsprozeduren sowie Regelungsalgorithmen enthält. Die Ausgabe der Steuerwerte, Fahranweisung und Meldungen erfolgt vorzugsweise im Open-loop-Betrieb und zum geringeren Teil im Closed-loop-Betrieb. Das Programmsystem SEBL arbeitet fast ausschließlich mit digitalen und binären Prozeßeingabe- und -ausgabedaten. Einzelheiten sind in [43] und [38] beschrieben. Der Konfigurationsunterschied zwischen Ziel- und Testprozeßrechner ist im Bild 3 zu erkennen. Der Zielprozeßrechner vom Typ KRS 4200 ist (neben einem zusätzlichen Trommelspeicher) mit einer Prozeßkopplungseinheit ursadat 4000 ausgestattet, die vorrangig für diskrete Prozeßdaten konfiguriert ist. Der verfügbare Testprozeßrechner hat dagegen nur das Koppelwerk SPOZA-2, das auf die Ein- und Ausgabe vorwiegend analoger Signale orientiert ist.

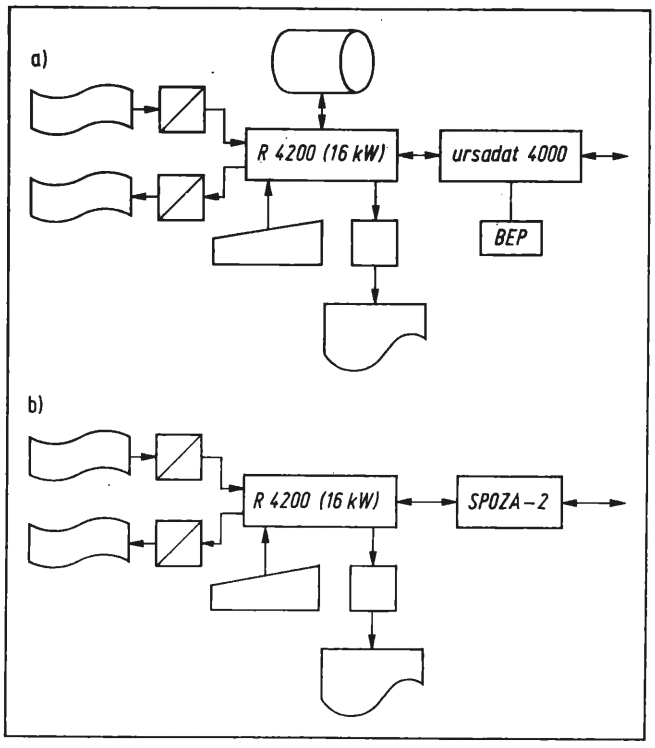
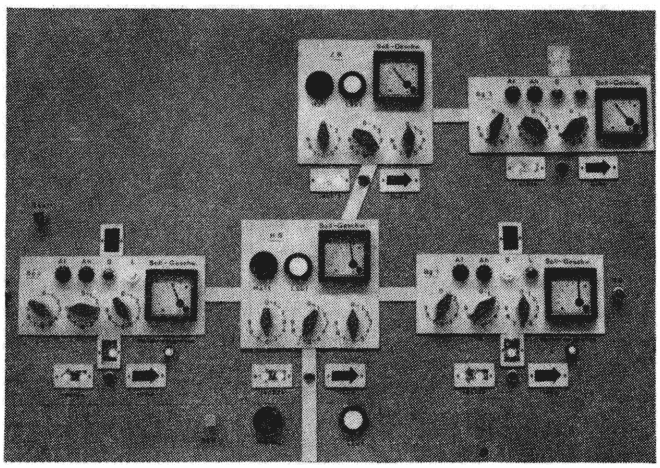


Bild 3. Konfigurationen
a) des Zielprozeßrechners; b) des Testprozeßrechners ▼

3.2. *Entwicklung der Testhilfsmittel*

Zur logischen Testung im Off-line-Betrieb wurde das aufgabenspezifische Testprogramm TSEB entwickelt [43]. Mit seiner Hilfe wurde eine Reihe von Testläufen durchgeführt und protokolliert, wobei die verwendeten Testdatensätze die wesentlichen Betriebssituationen in den Fahrbewegungen des Brückenverbandes darstellen. Die Testprotokolle wurden durch die zusätzliche Verwendung des Testausgabeprogramms PRAS noch aussagekräftiger gestaltet.
Zur Verwirklichung der On-line-Prozeßdatensimulation mußte aufgrund des erheblichen Unterschiedes zwischen den Prozeßkopplungseinheiten ein spezieller Prozeßdatensimulator konzipiert und aufgebaut werden. Er ist im Bild 4 abgebildet. Seine Ankopplung an das Programmsystem SEBL realisieren die speziellen Eingabe- und Ausgabeprogramme AWER, DAE und DAA. Die logische Testung im simulierten On-line-Betrieb erfolgte am Testprozeßrechner auf der Grundlage der genannten Testdatensätze sowie quasistetiger Veränderungen der Eingabegrößen. Zur selbsttätigen Notierung der entscheidenden Ausgaben des Programmsystems SEBL wurde das Protokollierungsprogramm ZUKO eingesetzt [38].

Bild 4. Spezieller Prozeßdatensimulator



3.3. *Ergebnisse*

Bereits mit den Testprogrammen TSEB und PRAS konnte das Programmsystem SEBL so gründlich getestet werden, daß später fast keine Fehler mehr auftraten.

Die Gegenüberstellung der bei den simulierten On-line-Testungen am Ziel- und am Testprozeßrechner gewonnenen Protokolle erbrachte Übereinstimmung und Gleichwertigkeit.
Mit diesen Ergebnissen ist die für das Verfahren der dedizierten Prozeßdatensimulation formulierte Zielstellung bei der konkreten Aufgabenstellung erreicht worden. Dies beweist die Anwendbarkeit des Verfahrens auch unter zum Teil ungünstigen Bedingungen. Dieses Feststellung erlaubt aber nicht den Schluß, daß das Verfahren generell anwendbar bzw. geeignet ist.

Zusammenfassung

Ausgehend vom „Software-Problem" beim Einsatz von Prozeß- und Mikrorechnern und einem Überblick der Aktivitäten zu seiner Lösung wird auf den Einsatz von Testprozeßrechnern zur Programmentwicklung eingegangen. Diese werden gemeinsam mit (Einprozessor-)Mikrorechner-Entwicklungssystemen als zielrechnerähnliche Entwicklungssysteme bezeichnet. Ihre Eignung zur Testung von Anwenderprogrammen für Prozeß- und Mikrorechner wird bewertet. Das zur Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten entwickelte Verfahren der dedizierten Prozeßdatensimulation wird begründet. Sein Prinzip besteht darin, durch software- und hardwareseitige Entwicklungen eine jeweils aufgabenspezifische Testumgebung zu schaffen und auf diesem Wege auch einen modifizierten Systemtest der unveränderten Zielrechnerprogramme zu gestatten. Das Verfahren wird an einem Anwendungsbeispiel demonstriert.

Literatur

[1] *Boehm, B. W.:* Software and its impact — a quantitative assessment. Datamation (1973) No. 5, pp. 48—59.
[2] *Koch, G. R.:* Entwurf und Entwicklung von maschinenorientierten Programmen für Mikrocomputer. Industrie-Elektrik-Elektronik **25** (1980) H. 2, S. 25—30; H. 4, S. 83—86.
[3] *Pilz, S.:* Betrachtungen zur Anwendung der Mikroelektronik in der Automatisierungstechnik. msr **23** (1980) H. 5, S. 278—281.
[4] *Grimm, R.; Herllin, I.:* Programmproduktion statt Programmhandwerk: Wege zu Programmsystem—Produktionsmitteln. rtp **22** (1980) H. 9, S. 314—321.
[5] *Koenig, S.:* Software Engineering und Systemtechnik für PDV-Projekte. Elektrotechn. Z. **101** (1980) H. 21, S. 1156—1159.
[6] *Kriesel, W.; Chorchordin, A. W.:* Problemstellungen der Software-Zuverlässigkeit bei Automatisierungssystemen mit Mikrorechnern. msr **24** (1981) H. 6, S. 316—320.
[7] *Williams, T. J.:* Two Decads of Change — A Review of the 20-Year History of Computer Control. Control Engineering **24** (1977) No. 9, pp. 71 to 76.
[8] *Schmidt, G.; Swik, R.:* Softwarefragen beim Einsatz von Mikroprozessoren für MSR-Aufgaben. rtp **20** (1978) H. 5, S. 143—150.
[9] *Hohmeyer, R. E.:* CDC 1700 FORTRAN for Process Control. IEEE Transactions of Industrial Electronics and Control Instrumentation **15** (1968) No. 2, pp. 67—70.
[10] *Schwald, A.; Baumann, R.:* PEARL im Vergleich mit anderen Echtzeitsprachen. rt **25** (1977) H. 11, S. 337—344.
[11] *Werum, W.; Windauer, H.:* PEARL-Beschreibung mit Anwendungsbeispielen. Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn 1978.
[12] *Pol, B.; Monninger, F.:* PEARL und Mikroprozessoren. Elektronik **29** (1980) H. 9, S. 65—70; H. 10, S. 73—77.
[13] *Born, W.:* Entwurf von prozeßsteuerungsorientierten Programmiersprachen. Dissertation A, TU Dresden 1974.
[14] *Leege, K.-W.:* Definition und Implementierung einer algorithmischen Echtzeitprogrammiersprache für robotron 4200 mit CAMAC-Peripherie. Dissertation A, TU Dresden 1979.
[15] *Rosenfeld, P.:* Microcomputer programming — a case for high level language. Instruments and Control Systems **50** (1977) No. 9, pp. 83—86.
[16] *Koch, G. R.:* Stand und Trends der Programmierung von Mikroprozessoren. Elektronik **26** (1977) H. 1, S. 63—66; H. 2, S. 66—71.
[17] *Huppertz, H. O.:* Die Programmiersprache CORAL 66. rtp **17** (1975) H. 7, S. 221—224.
[18] *Stiller, G.; Löper, H.:* Internationaler Stand und Entwicklungstrends auf dem Gebiet der problemorientierten Sprachen für Prozeßsteuerung. rd **13** (1976) H. 3, S. 9—13.
[19] *Steidten, K.:* Problemorientierte Systemunterlagen als Mittel der Rationalisierung der Einsatzvorbereitung von Prozeßrechnern. msr **14** (1971) H. 10, S. 377—380.
[20] *Hampel, J.; Warschau, B.:* Anwendungsmöglichkeiten des Generierungssystems GS 4201. rd **15** (1978) H. 5, S. 5—7.
[21] *Janecke, R.; Löns, K.:* AUTRAN, ein Softwaresystem für die Prozeßsteuerung. rtp **17** (1975) H. 10, S. 320—324.
[22] *Bürger, J.; Dreher, P.:* SIMAT C, ein Automatisierungssystem für verfahrenstechnische Prozesse. Siemens-Z. **50** (1976) H. 6, S. 363—370.
[23] *Krüger, G.:* Programmausrüstung für den Einsatz von Prozeßrechnern, Methoden zur Programmerstellung und Programmprüfung. Düsseldorf: INTERKAMA 1974, S. 108—114.
[24] *Plessmann, K. W.:* Probleme der Prozeßrechner-Software. rtp **13** (1971) H. 5, S. 162—165.
[25] Rechnergeführtes Prozeß-Automatisierungssystem. rtp **20** (1978) H. 4, S. 133.
[26] *Westphal B.:* Prozeßrechner-Software: Programmieren ohne Programmierer. rtp **17** (1975) H; 3, S. 94.
[27] *Rathsack, A.:* Grundsätzliches Herangehen bei der Programmtestung. rd **10** (1973) H. 12, S. 37—39.
[28] *Fritzsch, W.; Meyer, G.:* Mikroprozessoren, Mikroprozeßrechner und Mikroprozeßrechnersysteme. Elektrie **31** (1977) H. 4, S. 176—179.
[29] *Pedenon, J. F.; Monchaud, S.; Lemaire, B.:* Microprogrammed Biprocessor System for Real Time Processing. Preprints of the III. EUROMICRO-Symposium, Amsterdam 1977.
[30] *Wolter, H.:* Testen und Verifizieren von Prozeßrechnersoftware. rtp **19** (1977) H. 2, S. 58.
[31] *Bergholz, G.:* Modell für die Untersuchung des Echtzeitverhaltens eines Prozeßrechners. msr **18** (1975) H. 4, S. 134—137.
[32] *Bergholz, G.; Günther, M.; Reichel, W.; Saeltzer, G.:* Rechnergestützte Gestaltnug von Prozeßrechner-Anwendungssystemen. msr **18** (1975) H. 5, S. 190—192; H. 9, S: 332—336.
[33] *Zöphel, K.:* Dynamische Programmtests im Dialog. rd **15** (1978) H. 1, S. 29—31.
[34] *Adler, H.; Horn, Th.:* Zur Methode der Programmierung von Mikrorechnern. msr **23** (1980) H. 5, S. 251—254.
[35] *Schüring, A.:* Die Echtzeit-Prozeßsimulation: ein Hilfsmittel zur Entwicklung und Analyse der Prozeßsteuerung in flexiblen Fertigungssystemen. Dissertation, TU Aachen 1975.
[36] *Fomm, F.:* Simulation von Echtzeitoperationssystemen zwecks Testung der zeitlichen Belastung. Diplomarbeit 41-76-7, TH Ilmenau 1976.
[37] *Baumann, R.:* Computer aided design and implementation of control algorithms. Preprints of the VII. IFAC-Congress, Vol. 1, pp. 649—655, Helsinki 1978.
[38] *Reinhardt, H.:* Beitrag zur rationellen Programmentwicklung für rechnerautomatisierte Systeme durch Verwendung eines Testprozeßrechners mit dedizierter Prozeßdatensimulation. Dissertation B, Bergakademie Freiberg 1980.
[39] *Risak, V.:* Simulation von Digitalrechnern. München: Carl Hanser Verlag 1971.
[40] *Kerner, I. O.:* Programmtransformation. rd **12** (1975) Beiheft 2, S. 4—6.
[41] *Hackler, B.:* Ein Beitrag zur Simulation von gerätetechnischen Imitationen eines Mikrorechnersystems. Dissertation A, TU Dresden 1979.
[42] *Heinrich, P.; Goldacker, R.:* Test und Simulation von Echtzeitalgorithmen mit Hybridrechner. rd **17** (1980) H. 5, S. 17 und 18.
[43] *Brantner, P.; Lohmann, M.:* Untersuchungen zur logischen Testung von Prozeßrechnerprogrammen bei Verwendung eines Zweitrechners der gleichen Familie. Gemeinschaftsdissertation A, Bergakademie Freiberg 1978.
[44] *Uhlig, G.:* Verfahren zur Steuerung eines Abraumförderbrückenverbandes. DDR-WP Nr. 108348, 1974.
[45] *Uhlig, G.:* Ein Verfahren zur Steuerung der baggerseitigen Fahrbewegungen eines Abraumförderbrückenverbandes unter besonderer Berücksichtigung der Verringerung von technologisch bedingten Stillstandszeiten der Bagger. Dissertation A, Bergakademie Freiberg 1980.
[46] *Reinhardt, H.; Strzodka, K.:* Der Einsatz einer Abraumförderbrücke für 60 m Abtragsmächtigkeit in DDR-Braunkohlentagebauen und ihre automatische Steuerung durch einen Prozeßrechner. Vortragskurzfassungen der Konferenz über die Automatisierung der Bergbauprozesse, S. 64 und 65. Warna/Bulgarien 1976.
[47] *Reinhardt, H.; Strzodka, K.; Brantner, P.; Lohmann, M.:* Die 60-m-Abraumförderbrücke und ihre automatische Steuerung durch einen Prozeßrechner. Neue Bergbautechnik **7** (1977) H. 6, S. 428—432.

msr 7531

(Fortsetzung von Seite 321)

denden Elemente der Matrizen bekannt sein. Betrachtet man alle übrigen als Zufallsgrößen, so gelten die getroffenen Aussagen mit einer „Wahrscheinlichkeit" von eins für ein konkret vorgegebenes System.

Literatur

[1] *Corfmat, J. P.; Morse, A. S.:* Decentralized control of linear multivariable systems. Automatica Vol. **12** (1976) pp. 479—495.
[2] *Himmelblau, D. M.; Bischoff, K. B.:* Process Analysis and Simulation Deterministic Systems. New York/London/Sidney: John Wiley & Sons, Inc. 1968.
[3] *Lin, Ching-Tai:* Structural controllability. IEEE Trans. AC-**19** (1974) No. 3, pp. 201—208.
[4] *Glover, K.; Silvermann, I. M.:* Charakterization of structural controllability. IEEE Trans. AC-**21** (1976) pp. 534—537.
[5] *Wang, S. H.; Davison, E. J.:* On the stabilization of decentralized control systems. IEEE Trans. AC-**18** (1973) No. 5, pp. 473—478.
[6] *Lunze, J.:* Übersicht über die Verfahren zum Entwurf dezentraler Regler für lineare zeitinvariante Systeme. msr **23** (1980) H. 6, S. 315—322.

msr 7534

Prof. Dr. rer. nat. habil. *H. Bandemer*, Freiberg, und Dipl.-Math. *M. Wächtler*, Karl-Marx-Stadt[1])

Entscheidungstheoretische Optimierung von Beobachtungs- und Entscheidungsverfahren für Zuverlässigkeitsprüfungen von Erzeugnissen

IA 4.1.4.

1. Problemstellung

Ein wesentlicher Bestandteil der Qualitätsbeurteilung von Erzeugnissen verschiedenster Art ist die Frage nach der Zuverlässigkeit der hergestellten Produkte. Dabei interessiert die Zeitdauer T, in der das Erzeugnis wesentliche (je nach Verwendungszweck abzugrenzende) Anforderungen an die Funktionstüchtigkeit erfüllt.

Die Lebensdauer T unterliegt zufälligen Einflüssen und muß daher als Zufallsgröße behandelt werden. Die entsprechende Verteilungsfunktion $F(t) := P(T < t)$ $(t \in \boldsymbol{R}^+)$, die zur Einschätzung der Zuverlässigkeit benötigt wird, ist in der Regel unbekannt. Hieraus resultieren statistische Aufgabenstellungen, z. B. die Schätzung von Parametern der Verteilungsfunktion oder Tests von Hypothesen über dieselben. TGL 26 096 führt dazu eine Reihe von Verfahren an, wie sie gegenwärtig in der Praxis Anwendung finden.

Die Beurteilung der Güte solcher Verfahren und die Auswahl der dazu benötigten Prüfpläne orientieren sich an klassischen statistischen Kriterien, z. B. an der Wirksamkeit von Schätzungen oder bei Tests an den Wahrscheinlichkeiten für die Fehler 1. und 2. Art, im Sprachgebrauch der Zuverlässigkeitstheorie Hersteller- und Kundenrisiko genannt.

Diese Kriterien sind jedoch allein auf die Aussagesicherheit der zur Diskussion stehenden statistischen Verfahren bezogen. Unberücksichtigt bleibt dabei der für die Praxis doch sehr maßgebliche Aspekt der Kosten für die Realisierung solcher statistischer Verfahren, im folgenden als Versuchs- oder Prüfkosten bezeichnet.

Es ist leicht einzusehen, daß sich Forderungen einerseits nach hoher Aussagegenauigkeit und andererseits nach möglichst geringen Prüfkosten konträr gegenüberstehen. Somit erhebt sich die Forderung nach einem guten Kompromiß. Wie aber soll dieser aussehen?

Aussagesicherheit (z. B. Hersteller- und Kundenrisiko) und Prüfkosten sind nicht unmittelbar miteinander vergleichbar. Es lassen sich bestenfalls für gegebene Aussagesicherheit die Prüfkosten bzw. für gegebene Prüfkosten die Aussagesicherheit optimieren, womit das Poblem als solches nicht gelöst ist. (Ersteres wird z. B. in [1] vorgeschlagen.)

Zur Überwindung dieser Schwierigkeiten ziehen wir in Betracht, wozu die durch ein statistisches Verfahren einzuholenden Informationen dienen. In der Regel sind diese maßgebend für gewisse Entscheidungen über das weitere „Schicksal" der Erzeugnisse, z. B., ob diese ohne zusätzliche Maßnahmen an die Kunden ausgeliefert werden können, ob sie vorher noch weiteren Kontrollmaßnahmen zu unterziehen sind oder ob sie gar als Ausschuß behandelt werden müssen. Jede dieser Entscheidungsmöglichkeiten hat gewisse ökonomische Konsequenzen, die Entscheidungskosten genannt werden.

In die Betrachtungen zur optimalen Gestaltung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen werden nun neben der Art und Weise der Versuchsdurchführung (Versuchsplan) auch die Regeln einbezogen, die in Abhängigkeit vom vorliegenden Versuchsergebnis eine der möglichen Entscheidungen liefern (Entscheidungsfunktionen).

Zusammengehörige Paare von Versuchsplänen und Entscheidungsfunktionen faßt man auch unter dem Begriff Beobachtungsstrategien zusammen. Grundlage für die Bewertung solcher Beobachtungsstrategien bilden die Versuchskosten einerseits und die zu erwartenden Entscheidungskosten andererseits.

Dagegen kommt der Aussagesicherheit des statistischen Prüfverfahrens nur noch mittelbare Bedeutung zu. Die gemäß TGL 26 096 geforderte und auch in [1] vorausgesetzte Vorgabe von Hersteller- und Kundenrisiko wird sich als überflüssig erweisen.

Im Abschn. 2. wird auf der Grundlage der statistischen Entscheidungstheorie ein mathematisches Modell entwickelt, das den vorangegangenen Überlegungen Rechnung trägt. Dabei wird nicht das Ziel verfolgt, ein möglichst allgemeines Modell darzustellen (Verallgemeinerungsmöglichkeiten bestehen in vielfältiger Weise), sondern Anliegen ist es, die Grundgedanken der entscheidungstheoretischen Betrachtungsweise der Problematik von Zuverlässigkeitsprüfungen zu erläutern.

2. Statistisches Entscheidungsmodell für Zuverlässigkeitsprüfungen

Gegeben seien M Erzeugnisse (Maschinen, Baugruppen, Bauelemente usw.) gleichen Typs, von denen vorausgesetzt werden kann, daß deren zufällige Lebensdauer T der gleichen Verteilungsfunktion $F(t)$ genügt.

Dies ist in der Regel zutreffend, wenn es sich um unter gleichen Bedingungen aus gleichem Material gefertigte Erzeugnisse handelt.

Für den Produzenten ist von besonderem Interesse, daß möglichst wenige der M Erzeugnisse nach Auslieferung in einer vorgegebenen Zeitspanne $[0, T_0)$ (z. B. Garantiezeit) ausfallen, da ein solcher Ausfall Kosten und einen gewissen Prestigeverlust auf dem Weltmarkt verursacht. Insofern ist die „Güte" der Produkte von der Wahrscheinlichkeit

$$\alpha := P(T < T_0) = F(T_0) \tag{1}$$

abhängig.

Wir nehmen an, der Hersteller ziehe zwei Entscheidungsmöglichkeiten (Aktionen) in Betracht, die wir unter den Begriffen „Ablehnung" (symbolisch: a_1) und „Annahme" (symbolisch: a_2) führen wollen.

Im einzelnen wird man je nach Umständen und Art der Erzeugnisse unter „Ablehnung" differenzierte Maßnahmen zur Verringerung der Ausfallwahrscheinlichkeiten verstehen. In Extremfällen, z. B. bei Pfennigartikeln, kann damit das Wegwerfen bzw. das Verschrotten gemeint sein.

Demgegenüber bedeutet „Annahme" meistens die Auslieferung der Erzeugnisse ohne weitere Maßnahmen. Welche der Aktionen a_1 oder a_2 die geringeren Kosten verursacht, ist in der Regel abhängig von α. α ist aber gerade unbekannt. Um nicht „auf gut Glück" entscheiden zu müssen, sollen Informationen über α eingeholt und diese zur Entscheidung zwischen a_1 und a_2 ausgenutzt werden. Dazu beobachtet man gleichzeitig das Ausfallverhalten von n der M Erzeugnisse über einen Zeitraum $[0, t_0]$ $(n \in \{1, \ldots, M\}, t_0 \in [0, T_0])$.

Die Beobachtung ist jedoch vorzeitig abzubrechen, wenn sich vor dem Zeitpunkt t_0 bereits der k-te Ausfall ereignet $(k \in \{1, \ldots, n\})$. Wir nennen das Tripel $v := (n, k, t_0)$ Versuchsplan und bezeichnen die beschriebene Beobachtung des Ausfallverhaltens als Prüfung gemäß v. n, k und t_0 sind nicht etwa vorgegeben, sondern es wird gerade Gegenstand unserer Betrachtungen sein,

[1]) Mitteilung aus der Bergakademie Freiberg, Sektion Mathematik, und dem Forschungszentrum des Werkzeugmaschinenbaues Karl-Marx-Stadt.

den Versuchsplan in einem noch zu präzisierenden Sinne zu optimieren.

Bei einer Prüfung gemäß v sind zwei Zufallsgrößen zu beobachten, nämlich $A(v)$, die während der Prüfung gemäß v eintretenden Ausfälle (wobei Ausfälle im Zeitpunkt t_0 nicht mehr erfaßt werden) und $B(v)$, die Zeitdauer einer Prüfung gemäß v, auch Prüf- oder Versuchsanlagenbelegungszeit genannt. Dabei kann $A(v)$ die Werte 0, 1, ..., k annehmen, dagegen $B(v)$ alle Werte des Zeitintervalls $[0, t_0]$. Die eingetretene Realisierung von $B(v)$ kann als Entscheidungsgrundlage dienen, indem wir „ablehnen", falls sich die Realisierung von $B(v)$ kleiner erweist als t_0, und „annehmen", falls die Prüfung gemäß v bis zum Zeitpunkt t_0 andauert. (Unter Beachtung der Beziehungen $A(v) = k$ genau dann, wenn $B(v) < t_0$ und $A(v) < k$ genau dann, wenn $B(v) = t_0$ läßt sich die gleiche Entscheidungsregel auch auf der Grundlage der Beobachtung von $A(v)$ formulieren.)

Die verbal geschilderte Entscheidungsvorschrift formalisieren wir mathematisch, indem wir zu jedem Versuchsplan $v = (n, k, t_0)$ eine Abbildung $d(\cdot, v)$ vom Zeitintervall $[0, t_0]$ in die Menge $\boldsymbol{A} := \{a_1, a_2\}$ (Aktionenraum) definieren, mit der Eigenschaft

$$d\big(B(v), v\big) = \begin{cases} a_1, & \text{falls } B(v) < t_0 \\ a_2, & \text{falls } B(v) = t_0 . \end{cases} \tag{2}$$

$d(\cdot, v)$ heißt Entscheidungsfunktion (zum Versuchsplan v gehörig) und jedes Paar $\big(d(\cdot, v), v\big)$ Beobachtungsstrategie. Ferner seien

$$\boldsymbol{V} := \{v = (n, k, t_0): n \in \{1, \dots, M\},\ k \in \{1, \dots, n\},\ t_0 \in [0, T_0]\} \tag{3}$$

die Menge aller Versuchspläne und

$$\boldsymbol{D} := \{\big(d(\cdot, v), v\big)\}_{v \in \boldsymbol{V}} \tag{4}$$

die Menge (Familie) aller Beobachtungsstrategien, die wir in Betracht ziehen wollen.

Im allgemeinen wären zu jedem $v \in \boldsymbol{V}$ mehrere (konkurrierende) Entscheidungsfunktionen denkbar. Wir wollen uns aber auf die Zuordnung (2) beschränken, die jedem Versuchsplan $v \in \boldsymbol{V}$ genau eine Entscheidungsfunktion $d(\cdot, v)$ zuordnet, womit sich das Problem der Bestimmung einer „optimalen" Beobachtungsstrategie auf die „optimale" Wahl eines Versuchsplanes v aus $\boldsymbol{V}$ reduziert.

Wie bereits im Absch. 1. ausgeführt, sollen als Grundlage für die Bewertung der Beobachtungsstrategie bzw. der Versuchspläne sowohl die für eine Prüfung gemäß v notwendigen Kosten (Versuchskosten) als auch die ökonomischen Konsequenzen infolge der möglichen Entscheidungen a_1 und a_2 (Entscheidungskosten) dienen. Die Entscheidungs- und Versuchskosten sind i. allg. abhängig von der zufälligen Lebensdauer T der Erzeugnisse und somit Zufallsgrößen. Ihre Erwartungswerte lassen sich bei Kenntnis der Lebensdauerverteilungsfunktion $F(t)$ $(t \in \boldsymbol{R}^+)$ angeben. Jedoch wird $F(t)$ in den seltensten Fällen vollständig bekannt sein. Wir wollen aber mit den folgenden Voraussetzungen (5) und (6) fordern, daß $F(t)$ aus einer Familie von Verteilungsfunktionen stammt, die sich nur durch den Parameter $\alpha = F(T_0)$ unterscheiden und bis auf α ihrer Struktur nach bekannt sind, d. h., die Lebensdauerverteilungsfunktion $F(\cdot)$ soll durch $\alpha \in [0, 1]$ vollständig charakterisiert sein. In diesem Zusammenhang wollen wir α den (unbekannten) Naturzustand und die Menge $\boldsymbol{Z}$ aller möglichen Naturzustände α den Zustandsraum der Natur nennen ($\boldsymbol{Z} \subseteq [0, 1]$).

Es sei nun $\{F(\cdot, \alpha)\}_{\alpha \in \boldsymbol{Z}}$ eine Familie bekannter Verteilungsfunktionen mit der Eigenschaft:

$$\forall \alpha \in \boldsymbol{Z}: F(T_0, \alpha) = \alpha \tag{5}$$

und es gelte:

$$F(\cdot) \in \{F(\cdot, \alpha)\}_{\alpha \in \boldsymbol{Z}} . \tag{6}$$

Zur Verdeutlichung der Voraussetzungen (5) und (6) stellen wir uns die Familie aller Exponentialverteilungen vor, d. h., es gelte z. B.:

$$\forall \alpha \in \boldsymbol{Z} = (0, 1)\ \forall t \in \boldsymbol{R}^+: F(t, \alpha) = 1 - \exp(-\lambda_\alpha t)$$

$$\text{mit } \lambda_\alpha := -\big(\ln(1 - \alpha)\big)/T_0 . \tag{7}$$

Aus Beziehung (7) erkennt man, daß zwischen dem üblichen Parameter λ der Exponentialverteilung und α eine eineindeutige Beziehung besteht. Somit kann für jedes $\alpha \in \boldsymbol{Z} = (0, 1)$ die zugehörige Exponentialverteilungsfunktion $F(\cdot, \alpha)$ angegeben werden, in der Form:

$$\forall t \in \boldsymbol{R}^+: F(t, \alpha) = 1 - (1 - \alpha)^{(t/T_0)}. \tag{8}$$

Bei Verteilungstypen mit mehreren Parametern ist der Zusammenhang zwischen den Verteilungsparametern und α nicht mehr eindeutig. Durch Festsetzen eines bzw. mehrerer Parameter können jedoch die Beziehungen (5) und (6) wieder erfüllt werden.

Die eindeutige Charakterisierung der Verteilung durch α rechtfertigt die Schreibweise E_α, womit der zugehörige Erwartungswertoperator gemeint ist.

Wir kommen nun zur Modellierung der Versuchs- und Entscheidungskosten bzw. genauer deren Erwartungswerte. Diese sind i. allg. abhängig vom Naturzustand α und vom Versuchsplan v.

Bezeichnungen:

- $k(\alpha, v)$ Erwartungswert der Versuchskosten
- $k_1(\alpha, v)$ Erwartungswert der Ablehnungskosten
- $k_2(\alpha, v)$ Erwartungswert der Annahmekosten.

Ferner sei $G(v)$ die Summe aller bei einer Prüfung gemäß v beobachteten ausfallfreien Arbeitszeiten, kurz Gesamtprüfzeit genannt.

Die genaue Struktur von $k(\alpha, v)$, $k_1(\alpha, v)$ und $k_2(\alpha, v)$ wird von Fall zu Fall verschieden und mehr oder weniger kompliziert sein.

Wir wollen uns an dieser Stelle damit begnügen, ein zunächst einfaches mathematisch beherrschbares Beispiel in der folgenden Form anzugeben.

Es gelte für alle $\alpha \in \boldsymbol{Z}$ und alle $v \in \boldsymbol{V}$

$$k(\alpha, v) = c_1(n)\, E_\alpha B(v) + c_2 E_\alpha G(v) + c_3 E_\alpha A(v) + c_4 n , \tag{9}$$

wobei $c_1(n)$, c_2, c_3 und c_4 Kostenkoeffizienten derart seien, daß

- $c_1(n)\, E_\alpha B(v)$ die mit der Versuchsanlagenbelegungszeit proportional wachsenden Kosten (z. B. Kosten für die Standzeit, Personalkosten)
- $c_2\, E_\alpha G(v)$ die von der Gesamtprüfzeit abhängigen Kosten (z. B. Energiekosten)
- $c_3\, E_\alpha A(v)$ die Kosten in Abhängigkeit von der Anzahl der während einer Prüfung gemäß v ausgefallenen Prüflinge
- $c_4\, n$ die mit dem Stichprobenumfang n proportional wachsenden Kosten

beschreiben.

Weiterhin sei für alle $\alpha \in \boldsymbol{Z}$ und alle $v = (n, k, t_0) \in \boldsymbol{V}$

$$k_1(\alpha, v) = (M - n)\, k_{\mathrm{I}} \quad \text{und} \quad k_2(\alpha, v) = (M - n)\, k_{\mathrm{A}} \cdot \alpha . \tag{10}$$

Dabei seien k_{I} die Kosten für die Maßnahme „Ablehnung" je Erzeugnis und k_{A} die mittleren Kosten bei Ausfall eines ausgelieferten Erzeugnisses im Zeitraum $[0, T_0)$.

Schließlich gelte $c_4 \geqq k_{\mathrm{I}}$. (11)

Zur Interpretation der Voraussetzungen (9) bis (11) erscheinen einige Bemerkungen günstig. Die angegebene Kostenstruktur dient der Beurteilung des durch v charakterisierten Beobach-

tungs- und Entscheidungsverfahrens. Notwendig werdende Reparaturen an den Erzeugnissen sind produktionsbedingt und nicht die Folge der Beobachtungsstrategie. Letztere beeinflußt lediglich, ob die Notwendigkeit einer Reparatur bereits beim Hersteller oder erst beim Kunden festgestellt wird. Aus diesem Grund sind weder mit k_I und k_A noch mit den anderen Kostenkoeffizienten Reparaturkosten zu erfassen. Dafür sollen sich in k_A die Mehraufwendungen niederschlagen, die entstehen, wenn die Reparatur beim Kunden statt beim Hersteller erfolgt. Außerdem dient k der Erfassung von eventuellen Vertragsstrafen, Schadenersatz usw.

Die Struktur der Annahmekosten wird verständlich, wenn man beachtet, daß das Produkt $(M - n)\,\alpha$ gerade die zu erwartende Anzahl der Ausfälle bei den Abnehmern im Fall einer „Annahme" darstellt.

Der Faktor $(M - n)$ in den Ablehnungs- und Annahmekosten deutet darauf hin, daß die Entscheidung a_1 bzw. a_2 nur für die nicht der Prüfung gemäß v unterworfenen Erzeugnisse wirksam wird. Demgegenüber sind die geprüften Objekte bestimmten Maßnahmen zu unterziehen, deren Kostenaufwand insbesondere mit den Komponenten $c_3 E_\alpha A(v)$ und $c_4 n$ zu beschreiben sind, während die Terme $c_1(n)$ $E_\alpha B(v)$ und $c_2 E_\alpha G(v)$ die Kosten für die unmittelbare Versuchsdurchführung ausdrücken.

Über die weitere Verwendung der einer Prüfung gemäß v unterzogenen Erzeugnisse und auch der „abgelehnten" Objekte ist gesondert (d. h. außerhalb des beschriebenen statistischen Entscheidungsverfahrens) zu befinden, was unter Umständen gewisse „Stillstandskosten" zur Folge haben kann, die durch c_4 und k_I zu berücksichtigen sind. Die Voraussetzung (11) ist gewährleistet, wenn man fordert, daß die geprüften n Erzeugnisse im Anschluß an die Prüfung mindestens den gleichen Maßnahmen zu unterziehen sind wie die „abgelehnten".

Mit den bisher getroffenen Festlegungen und entwickelten Beziehungen läßt sich eine Funktion $L(\alpha,(a_i, v))$ $(i \in \{1, 2\})$ über $\boldsymbol{Z} \times \boldsymbol{E}$ mit

$$\boldsymbol{E} := \boldsymbol{A} \times \boldsymbol{V} = \{(a_i, v) : a_i \in \{a_1, a_2\}, v \in \boldsymbol{V}\} \tag{12}$$

definieren, die die finanziellen Aufwendungen (Verlust) angibt, die zu erwarten sind, wenn bei vorliegendem Naturzustand α die Prüfung gemäß v die Entscheidung a_i zur Folge hat. Wir nennen $L(\alpha, (a_i, v))$ Verlustfunktion und $\boldsymbol{E}$ Entscheidungsraum des Statistikers.

Für alle $\alpha \in \boldsymbol{Z}$ und alle Paare $(a_i, v) \in \boldsymbol{E}$ sei

$$L(\alpha, (a_i, v)) = k(\alpha, v) + k_i(\alpha, v)\,. \tag{13}$$

Welche der Entscheidungen a_1 bzw. a_2 getroffen wird, hängt gemäß Beziehung (2) von der (zufälligen) Versuchsanlagenbelegungszeit $B(v)$ ab. Wir setzen deshalb statt der konkreten Entscheidung a_1 bzw. a_2 die Zufallsgröße $d(B(v), v)$ in L ein, wodurch L selbst zur Zufallsgröße wird. Wegen dieser Zufallsabhängigkeit empfiehlt sich der Übergang zum Erwartungswert.

Es sei für alle Naturzustände $\alpha \in \boldsymbol{Z}$ und alle Beobachtungsstrategien $(d(\cdot, v), v) \in \boldsymbol{D}$:

$$R(\alpha, (d(\cdot, v), v)) := E_\alpha L\big(\alpha, \big(d(B(v), v), v\big)\big)\,. \tag{14}$$

Die Funktion $R(\alpha, \big(d(\cdot, v), v\big))$ heißt Risikofunktion, und es gilt mit Beziehung (13):

$$R\big(\alpha, (d(\cdot, v), v)\big) = k(\alpha, v) + k_1(\alpha, v) + \\ + [k_2(\alpha, v) - k_1(\alpha, v)] \cdot C\big(\alpha, (d(\cdot, v), v)\big) \tag{15}$$

mit $C\big(\alpha, (d(\cdot, v), v)\big) := P\big(d(B(v), v) = a_2\big)$.

$C\big(\alpha, \big(d(\cdot, v), v\big)\big)$ stellt die Wahrscheinlichkeit der „Annahme" bei Benutzung der Beobachtungsstrategie $\big(d(\cdot, v), v\big)$ und gegebenem α dar. Für jede Beobachtungsstrategie $\big(d(\cdot, v), v\big) \in \boldsymbol{D}$ wird $C\big(\alpha, \big(d(\cdot, v), v\big)\big)$, aufgefaßt als Funktion von $\alpha \in \boldsymbol{Z}$, auch als Operationscharakteristik von $(d(\cdot, v), v)$ bezeichnet. Die über $\boldsymbol{Z} \times \boldsymbol{D}$ definierte Risikofunktion ist als Optimalitätskriterium für eine „möglichst gute" Wahl der Beobachtungsstrategie bzw. des Versuchsplanes geeignet. Das Tripel $[\boldsymbol{Z}, \boldsymbol{D}, \boldsymbol{R}]$ stellt ein statistisches Entscheidungsproblem im Sinne der statistischen Entscheidungstheorie dar. Wie bei allgemeinen statistischen Entscheidungsproblemen hängt auch in unserem Spezialfall die Risikofunktion und damit die Optimalität von Beobachtungsstrategien vom Naturzustand α ab. Aus der Entscheidungstheorie sind mehrere Möglichkeiten zur Überwindung der α-Abhängigkeit bekannt. Wir wollen in diesem Rahmen nur eine dieser Vorgehensweise verfolgen, nämlich die der Nutzung von Vorkenntnissen über α.

Zunächst überlegen wir uns, wie zu verfahren wäre bei bekanntem α. In diesem Fall kann man gemäß Beziehung (10) Annahme- und Ablehnungskosten miteinander vergleichen.

Ist α kleiner als $\alpha_0 := k_I/k_A$, so sind die Annahmekosten geringer als die Ablehnungskosten. Dagegen gestaltet sich die Ablehnung kostengünstiger für $\alpha > \alpha_0$. Dies gilt auch, wenn der Entscheidung zwischen a_1 und a_2 keine Prüfung gemäß eines Versuchsplanes $v \in \boldsymbol{V}$ vorausgeht. Wir führen dafür symbolisch den (unechten) Versuchsplan v^0 ein.

Wie man sich leicht überlegt, muß für alle $\alpha \in \boldsymbol{Z}$ gelten:

$$k(\alpha, v^0) = 0,\ k_1(\alpha, v^0) = Mk_I \text{ und}$$

$$k_2(\alpha, v^0) = Mk_A \cdot \alpha\,. \tag{16}$$

Die Wahl des Versuchsplanes v^0 bedeutet, es wird nicht beobachtet. Demzufolge kann auch keine Entscheidungsfunktion definiert werden, die basierend auf dem Beobachtungsergebnis einen der Werte a_1 oder a_2 annimmt.

Um aber die Optimierungsaufgabe geschlossen formulieren zu können, definieren wir formal zu v° die konstanten (unechten) Entscheidungsfunktionen

$$d_1(\cdot, v^\circ) := a_1 \quad \text{und} \quad d_2(\cdot, v^\circ) := a_2 \tag{17}$$

und beziehen die (unechten) Beobachtungsstrategien $\big(d_1(\cdot, v^0), v^0\big)$ und $\big(d_2(\cdot, v^0), v^0\big)$ in das Optimierungsproblem ein.

Wegen Beziehung (16) folgt:

$$R\big(\alpha, \big(d_1(\cdot, v^0), v^0\big)\big) := L(\alpha, (a_1, v^0)) = Mk_I \text{ und}$$

$$R\big(\alpha, \big(d_1(\cdot, v^0), v^0\big)\big) := L(\alpha, (a_2, v^0)) = Mk_A \cdot \alpha\,. \tag{18}$$

Eine Beobachtungsstrategie $\big(\tilde{d}(\cdot, \tilde{v}), \tilde{v}\big) \in \overline{\boldsymbol{D}} = \boldsymbol{D} \cup \{\big(d_1(\cdot, v^0), v^0\big), \big(d_2(\cdot, v^0), v^0\big)\}$ heißt optimal bezüglich $\alpha \in \boldsymbol{Z}$, wenn gilt:

$$R\big(\alpha, \big(\tilde{d}(\cdot, \tilde{v}), \tilde{v}\big)\big) = \min_{(d(\cdot, v), v) \in \overline{\boldsymbol{D}}} R\big(\alpha, \big(d(\cdot, v), v\big)\big)\,. \tag{19}$$

Unter den Voraussetzungen (9) bis (11) kann man zeigen, daß eine bezüglich $\alpha \in \boldsymbol{Z}$ optimale Beobachtungsstrategie die folgende Form hat:

Falls $\alpha \leqq \alpha_0 = k_I/k_A$, dann nimm an ohne Prüfung

$\big(\text{d. h. } \big(d_2(\cdot, v^0), v^0\big)\big)$,

falls $\alpha \geqq \alpha_0$, dann lehne ab ohne Prüfung (20)

$\big(\text{d. h. } \big(d_1(\cdot, v^0), v^0\big)\big)$.

Die Beobachtungsstrategie (20) sagt aus, daß bei der vorausgesetzten Struktur der Verlust- und Risikofunktionen sich eine Prüfung der Erzeugnisse nicht lohnt, wenn bekannt ist, ob α größer oder kleiner α_0 sein wird.

Obwohl es sich dabei um relativ schwache Anforderungen an den Kenntnisstand über α handelt, kann die Aussage „$\alpha \leqq \alpha_0$" oder „$\alpha \geqq \alpha_0$" oft nicht getroffen werden. Dafür liegen nicht selten Aussagen über die Häufigkeit des Auftretens bestimmter α-Werte vor, z. B. aus vorangegangenen Versuchen, aus Kundendienstunterlagen oder aufgrund von Expertenmeinungen, die sich in Form einer Wahrscheinlichkeitsverteilung ξ, einer sog. A-priori-Verteilung, ausdrücken lassen. Da nun α als Zufallsgröße (mit bekannter Wahrscheinlichkeitsverteilung ξ)

zu verstehen ist, macht sich eine Modifikation der Risikofunktion notwendig, der wir uns nun zuwenden wollen.
Es sei ξ ein Wahrscheinlichkeitsmaß über $\boldsymbol{Z}$. Dann heißt die Funktion mit der definierenden Beziehung:

$$\forall (d(\cdot, v), v) \in \overline{\boldsymbol{D}}: r(\xi, (d(\cdot, v), v)) := E_\xi R(\alpha, (d(\cdot, v), v)) \quad (21)$$

Bayessches Risiko.
Weiterhin heißt eine Beobachtungsstrategie $(\hat{d}(\cdot, \hat{v}), \hat{v}) \in \overline{\boldsymbol{D}}$ Bayessch bezüglich ξ, wenn gilt:

$$r(\xi, (d(\cdot, v), v)) = \min_{(d(\cdot, v), v) \in \overline{\boldsymbol{D}}} r(\xi, (d(\cdot, v), v)) . \quad (22)$$

Analog zur Aussage (20) zeigt sich, daß unter den Voraussetzungen (9) bis (11) eine Bayessche Beobachtungsstrategie gegeben ist mit $(d_2(\cdot, v^0), v^0)$ („Annahme" ohne Prüfung), falls die Bedingung $P(\alpha \leqq \alpha_0) = 1$ erfüllt ist, und die Beobachtungsstrategie $(d_1(\cdot, v^0), v^0))$ („Ablehnung" ohne Prüfung) diese Optimalitätseigenschaft aufweist, wenn gilt $P(\alpha \geqq \alpha_0) = 1$. Im allgemeinen jedoch sind Bayessche Beobachtungsstrategien in ganz $\overline{\boldsymbol{D}}$ zu suchen.
Die konkrete Gestalt der Bayesschen Risikofunktion hängt vom Typ der Familie $\{F(\cdot, \alpha)\}_{\alpha \in \boldsymbol{Z}}$ (vgl. Beziehungen (5) und (6)) und der A-priori-Verteilung ξ ab. Nicht immer wird sich eine explizite Darstellung finden lassen. Die folgende Voraussetzung ermöglicht die Behandlung vieler praktischer Probleme und gestattet eine explizite Darstellung des Bayesschen Risikos.
Es sei $\boldsymbol{Z} := (0, 1)$ und in Ergänzung zu den Beziehungen (5) und (6) gelte:

$$\forall \alpha \in \boldsymbol{Z} \ \forall t \in \boldsymbol{R}^+ : F(t, \alpha) = 1 - (1 - \alpha)^{(t/T_0)} . \quad (23)$$

Die A-priori-Verteilung ξ aus Beziehung (21) besitze eine Dichtefunktion $w(\alpha, (\tau, \nu))$ der Form:

$$\forall \alpha \in \boldsymbol{Z} : w(\alpha, (\tau, \nu)) = \\ = \frac{(-1)^{\nu - 1}}{(\nu - 1)!} \tau^\nu [\ln (1 - \alpha)]^{\nu - 1} (1 - \alpha)^{\tau - 1} \quad (24)$$

mit den Parametern $\tau \in (0, \infty)$ und $\nu \in \{1, 2, \ldots\}$.
Mit Beziehung (23) wird vorausgesetzt, daß die Lebensdauer T einer Exponentialverteilung genügt (vgl. Beziehungen (7) und (8)). Die Voraussetzung (24) ist genau dann erfüllt, wenn die zugehörige Ausfallrate $\lambda_\alpha = -(\ln (1 - \alpha))/T_0$ die Gammadichte

$$\overline{w}(\lambda_\alpha, (\tau \cdot T_0, \nu)) := \frac{(\tau T_0)^\nu}{\Gamma(\nu)} \lambda_\alpha^{\nu - 1} e^{-\tau T_0 \lambda_\alpha} \quad (25)$$

hat.
Wir schreiben im folgenden $r((\tau, \nu), (d(\cdot, v), v))$ statt $r(\xi, (d(\cdot, v), v))$ und $E_{(\tau, \nu)}$ für den Erwartungswertoperator des Wahrscheinlichkeitsmaßes mit der Dichte (24).
Unter den Voraussetzungen (5) (6) (9) bis (11) (23) und (24) läßt sich nun folgendes weitreichendes Ergebnis zeigen, dessen Beweis demnächst veröffentlicht wird.
Es gilt:

$$r((\tau, \nu), (d_1(\cdot, v^0), v^0)) = M k_I , \quad (26)$$

$$r((\tau, \nu), (d_2(\cdot, v^0), v^0)) = M k_A E_{(\tau, \nu)} \alpha \\ = M k_A \left[1 - \left(\frac{\tau}{\tau + 1}\right)^\nu\right] \quad (27)$$

und

$$\forall (d(\cdot, v), v) \in \boldsymbol{D}: \\ r((\tau, \nu), (d(\cdot, v), v))$$

$$= c_1(n) E_{(\tau, \nu)} B(v) + c_2 E_{(\tau, \nu)} G(v) + c_3 E_{(\tau, \nu)} A(v) + c_4 n + (M - n) \left\{k_I + \tau^\nu \left[(k_A - k_I) \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\gamma(n, k, n - i)}{[\psi(n - i) + \tau]^\nu} - \right.\right. \\ \left.\left. - k_A \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\gamma(n, k, n - i)}{[\psi(n - i) + \tau + 1]^\nu} \right]\right\} \quad (28)$$

mit

$$\psi := \frac{t_0}{T_0},$$

$$\gamma(n, k, n - i) := (-1)^{k - 1 - i} \frac{n!}{(n - k)! (n - i)\, i! (k - 1 - i)!} \quad (n \in \{1, 2, \ldots\},\ k \in \{1, \ldots, n\},\ i \in \{0, 1, \ldots, k - 1\}). \quad (29)$$

$$E_{(\tau, \nu)} B(v) = \begin{cases} - T_0 \tau \left[\ln \tau \sum_{i=0}^{k-1} \frac{1}{n - i} - \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\gamma(n, k, n - i)}{n - i} \ln (\psi(n - i) + \tau)\right], & \text{für } \nu = 1 \\ T_0 \frac{\tau}{\nu - 1} \left[\sum_{i=0}^{k-1} \frac{1}{n - i} - \tau^{\nu - 1} \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\gamma(n, k, n - i)}{(n - i)[\psi(n - i) + \tau]^{\nu - 1}}\right], & \text{für } \nu = 2, 3, \ldots, \end{cases} \quad (30)$$

$$E_{(\tau, \nu)} G(v) = \begin{cases} \left.\begin{cases} - T_0 \tau \left[k \ln \tau - (n - k) \sum_{i=0}^{k=1} \frac{\gamma(n, k, n - i)}{n - i - 1} \ln (\psi (n - i) + \tau)\right], & \text{für } k < n \\ - T_0 \tau n \ln \frac{\tau}{\psi + \tau}, & \text{für } k = n \end{cases}\right\} \text{für } \nu = 1 \\ \left.\begin{cases} T_0 \frac{\tau}{\nu - 1} \left[k - \tau^{\nu - 1} (n - k) \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\gamma(n, k, n - i)}{(n - i - 1)[\psi(n - i) + \tau]^{\nu - 1}}\right], & \text{für } k < n \\ T_0 \frac{\tau}{\nu - 1} n \left[1 - \left(\frac{\tau}{\psi + \tau}\right)^{\nu - 1}\right], & \text{für } k = n \end{cases}\right\} \text{für } \nu = 2, 3 \ldots \end{cases} \quad (31)$$

und

$$E_{(\tau, \nu)} A(v) = \begin{cases} k - \tau^\nu (n - k) \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\gamma(n, k, n - i)}{(n - i - 1)[\psi(n - i) + \tau]^\nu}, & \text{für } k < n \\ n \left[1 - \left(\frac{\tau}{\psi + \tau}\right)^\nu\right], & \text{für } k = n. \end{cases} \quad (32)$$

Die Struktur des Bayesschen Risikos mit den Beziehungen (26) bis (32) erlaubt i. allg. keine analytische Lösung des Optimierungsproblemes.
Durch Anwendung der modernen Rechentechnik ist es jedoch mit vertretbarem Aufwand möglich, Bayessche Beobachtungsstrategien mit hinreichender Genauigkeit zu bestimmen.
Die Rechnungen zu dem im Abschn. 3. angegebenen Beispiel wurden mit dem programmierbaren Tischrechner robotron K 1002 innerhalb von wenigen Stunden durchgeführt.
In Spezialfällen sind auch analytische Lösungen möglich, z. B. wenn alle M Erzeugnisse unabhängig voneinander geprüft werden sollen und lediglich die Prüfzeit t_0 zu optimieren ist. Auch darüber ist eine gesonderte Veröffentlichung geplant.

3. Beispiel im Vergleich zu herkömmlichen Vorgehensweisen

Zur Illustration der entscheidungstheoretischen Optimierung von Beobachtungs- und Entscheidungsverfahren bei Zuverlässigkeitsuntersuchungen gehen wir von einem Beispiel aus, das in [1] angegeben ist.
Dort wurden festgelegt:

- der nichtannehmbare mittlere Ausfallabstand $\Theta_u = 500$ [h]
- das Abnehmerrisiko $\beta = 0,1$ (33)
- der annehmbare mittlere Ausfallabstand $\Theta_0 = 1500$ [h] und
- das Herstellerrisiko $\alpha = 0,1$.

Bei Vorgabe dieser vier Größen liefert die TGL 26096/06 (vgl. [2]) unter der Voraussetzung, daß die interessierenden Lebensdauern exponentiell mit einem Parameter $\Theta = ET \in (0, \infty)$ verteilt sind, Beobachtungs- und Entscheidungsverfahren hinsichtlich der Annahme bzw. Ablehnung von Erzeugnissen, die sich auf die Beobachtung der Gesamtprüfzeit $\bar{G}$ von n gleichzeitig bis zum r-ten Ausfall geprüften Objekten gründen ($n \in \{1, 2, ...\}$, $r \in \{1, ..., n\}$).
Eine Annahme erfolgt, wenn die Bedingung

$$\hat{\Theta} := \frac{\bar{G}}{r} \geqq c \quad (c \in \boldsymbol{R}^+ - \{0\}) \tag{34}$$

erfüllt ist, andernfalls wird abgelehnt.
Im Gegensatz zur Prüfung gemäß eines Versuchsplanes $v = (n, k, t_0) \in \boldsymbol{V}$ hat die Prüfdauer $\bar{B}$ keine obere Schranke t_0, sondern $\bar{B}$ wird lediglich durch den zufälligen Zeitpunkt des Eintretens des r-ten Ausfalles begrenzt.
Wir betrachten in diesem Zusammenhang nur Prüfpläne der Form $(n, 0, r)$ (vgl. [2]), d. h., ausgefallene Objekte sollen nicht ersetzt werden.
Für den Erwartungswert $E_\Theta \bar{B}$ der zufälligen Versuchsanlagenbelegungszeit ergibt sich dann nach [2] und [3]

$$E_\Theta \bar{B} = \Theta \sum_{i=0}^{r-1} \frac{1}{n-i}. \tag{35}$$

Der in der TGL 26 096/06 vorgeschriebene Algorithmus führt bei Vorgabe der Beziehung (33) zu den Werten

$$r = 6 \quad \text{und} \quad c = 773 \text{ [h]}. \tag{36}$$

Der Stichprobenumfang n bleibt bis auf die Bedingung $n \geqq r = 6$ zunächst frei wählbar. An dieser Stelle wird in [1] vorgeschlagen, n in bezug auf eine Kostenfunktion der Form

$$k_3(n, 0, r) = n \cdot k_E + cK(n, r)\, k_p$$
$$\text{mit} \quad K(n, r) = \sum_{i=0}^{r-1} \frac{1}{n-i} \tag{37}$$

zu optimieren.
Dabei sollen mit $n \cdot k_E$ die mit dem Stichprobenumfang wachsenden und durch $cK(n, r)\, k_p$ die zur Prüfdauer proportionalen Kosten erfaßt werden, d. h., k_E entspricht c_4 und k_p ist analog zu $c_1(n)$ (vgl. Beziehung (9)).
Allerdings wird der zweite Summand in der Kostenfunktion dieser Absicht nicht gerecht, denn sie müßte exakt lauten:

$$\bar{k}_3(n, 0, r) = nk_E + k_p \cdot E_\Theta \bar{B} \tag{38}$$
$$= nk_E + k_p \cdot \Theta \sum_{i=0}^{r-1} \frac{1}{n-i}.$$

Die Kostenfunktion (38) enthält den wahren unbekannten mittleren Ausfallabstand Θ, von dem man sich in [1] unabhängig zu machen versucht, indem Θ unter Verweis auf Beziehung (34) durch das Annahmekriterium c ersetzt wird. Die Annahmebedingung (34) stellt jedoch keine Rechtfertigung für diese Substitution dar, und es gibt auch keine plausible Begründung für diesen Schritt. Die Bestimmung des Annahmekriteriums c nach TGL 26 096/06 ist völlig unabhängig vom wahren Parameter Θ. Somit kann c Werte in Abhängigkeit der Festlegung (33) Werte annehmen, die erheblich kleiner oder größer als Θ sind.
Den die Kostenfunktion (37) minimierenden Stichprobenumfang n^* erhält man durch sukzessives Einsetzen von $n = r, r+1, ...$, wobei sich mit $r = 6$, $c = 773$ [h] und der Annahme

$$k_p = 50 \text{ [M/h]} \quad \text{und} \quad k_E = 3000 \text{ [M]} \tag{39}$$

ergibt:

$$n^* = 12 \quad \text{und} \quad k_3(12, 0, 6) \approx 61{,}25 \text{ [TM]}. \tag{40}$$

Das davon abweichende Ergebnis aus [1] ist dadurch bedingt, daß dort mit $r = 5$ statt, wie richtig, mit $r = 6$ gerechnet wurde.
Das angeführte Beispiel erweitern und modifizieren wir derart, daß der im Abschn. 2. entwickelte mathematische Apparat mit den Voraussetzungen (5), (6), (9) bis (11), (23) und (24) Anwendung finden kann.
Wir setzen:

$$\left.\begin{aligned} &c_1(n) := k_p = 50 \text{ [M/h]} \quad (\text{für alle } n \in \{1, 2, ...\}),\\ &c_2 := 0, \quad c_3 := 0,\\ &c_4 := k_E = 3000 \text{ [M]},\\ &T_0 := 300 \text{ [h]}\\ &M := 100\\ &k_I := 3000 \text{ [M]}, \quad k_A := 15000 \text{ [M]}. \end{aligned}\right\} \tag{41}$$

Mit obiger Festlegung der Kostenkoeffizienten $c_1(n)$, c_2, c_3 und c_4 erhalten die Versuchskosten $k(\alpha, v)$ (vgl. Beziehung (9)) die Form (38). Der Annahme von $\Theta_u = 590$ [h] und $\Theta_0 = 1500$ [h] wird indirekt entsprochen mit der Festlegung von T_0, k_I und k_A (Bild 1a). Dabei beachte man, daß sich die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalles im Zeitraum $[0, T_0)$ und die mittlere Lebensdauer Θ in eineindeutiger Weise entsprechen gemäß

$$\alpha_\Theta = 1 - \exp(-T_0/\Theta) \quad \text{bzw.} \quad \Theta_\alpha = -T_0/\ln(1-\alpha). \tag{42}$$

Insbesondere gilt für $\alpha_0 = k_I/k_A$:

$$\Theta_{\alpha_0} = -T_0/\ln\left(1 - \frac{k_I}{k_A}\right) \approx 1344 \text{ [h]}. \tag{43}$$

Beträgt die mittlere Lebensdauer mehr als 1344 h, so ist die „Annahme" die kostengünstigere Entscheidung, andernfalls ist die „Ablehnung" zu bevorzugen.
Für den interessierenden „ausfallempfindlichen" Zeitraum $[0, T_0)$ wurde die verhältnismäßig kurze Frist von 300 h angenommen, um zu erreichen, daß der nach Vorgabe (33) als annehmbar deklarierte Ausfallabstand $\Theta_0 = 1500$ [h] noch in dem die Annahme begünstigenden Bereich liegt. Als letztes vereinbaren wir die Parameter der A-priori-Dichte (24) mit

$$\tau := 10 \quad \text{und} \quad \nu := 2 \text{ (Bild 2)}. \tag{44}$$

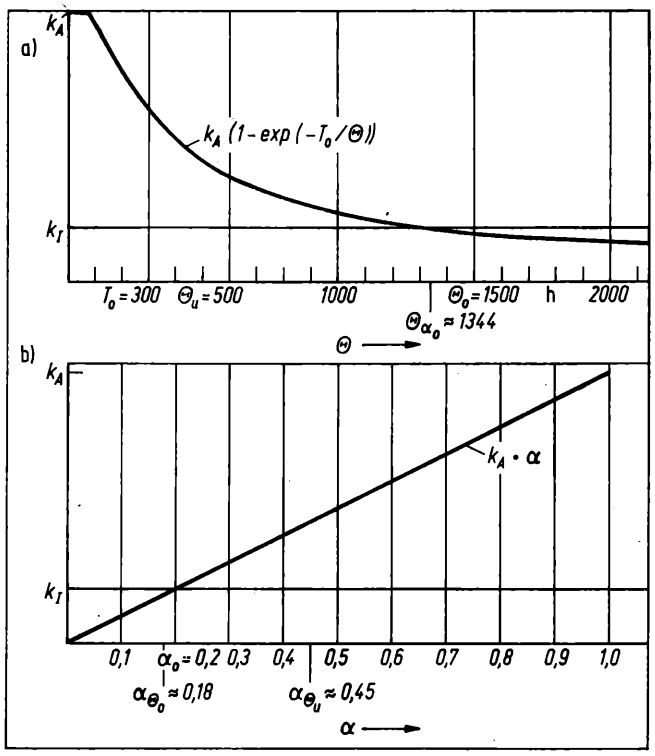


Bild 1. Annahme- und Ablehnungskosten je Erzeugnis
a) in Abhängigkeit der mittleren Lebensdauer Θ; b) in Abhängigkeit von α

Infolge der Vorgaben (39) (41) und (44) erweist sich als Bayessch die Beobachtungsstrategie $(\hat{d}(\cdot, \hat{v}), \hat{v})$ mit

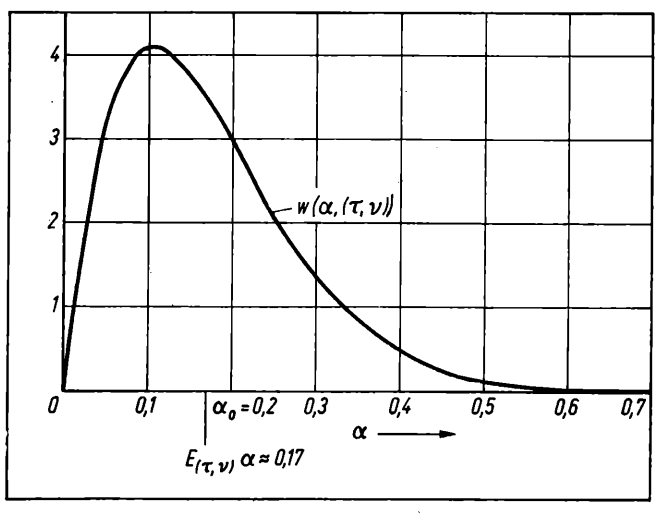
$$\hat{v} = (\hat{n}, \hat{k}, \hat{t}_0) = (11, 2, 180) \tag{45}$$

und $r\big((10{,}2), (\hat{d}(\cdot, \hat{v}), \hat{v})\big) \approx 249{,}45$ [TM].
($\hat{t}_0 = 180$ [h] ist als gerundeter Wert zu verstehen.)
Das minimale Bayessche Risiko von rd. 249,45 [TM] gliedert sich auf in 40,65 [TM] für die Prüfung und in 208,8 [TM] als Folge der Entscheidung.
Neben den zu erwartenden Kosten (Risiko) ist oft auch der Erwartungswert $E_{(\tau,\nu)}B(v)$ der Versuchsanlagenbelegungszeit bei der Prüfung gemäß v von Interesse. Man errechnet

$$E_{(10,2)}\,B(\hat{v}) \approx 153\ [\mathrm{h}]\,. \tag{46}$$

Für die (unechten) Beobachtungsstrategien $(d_1(\cdot, v^0), v^0)$ („Ablehnung" ohne Prüfung) und $(d_2(\cdot, v^0), v^0)$ („Annahme" ohne

Bild 2. A-priori-Dichte $w(\alpha, (\tau, \nu))$; für $\tau = 10$ und $\nu = 2$



Prüfung) erhält man:

$$\left.\begin{aligned} &r\big((10{,}2), (d_1(\cdot, v^0), v^0)\big) = 300\ [\mathrm{TM}] \quad \text{und} \\ &r\big((10{,}2), (d_2(\cdot, v^0), v^0)\big) \approx 260{,}33\ [\mathrm{TM}]\,. \end{aligned}\right\} \tag{47}$$

Man beachte, daß eine Prüfung gemäß $\hat{v}$ trotz des damit verbundenen finanziellen Aufwandes eine Verringerung des Risikos um rd. 10 [TM] gegenüber der „richtigen" Entscheidung ohne Prüfung bringt.
Abschließend wollen wir untersuchen, wie in unserem durch die Annahmen (39), (41) und (44) charakterisierten Beispiel das aus der TGL 26096 und [1] abgeleitete Beobachtungs- und Entscheidungsverfahren mit $n = 12$, $r = 6$ und $c = 773$ [h] im Hinblick auf die zu erwartenden Versuchs- und Entscheidungskosten zu bewerten ist. Dabei soll die Berücksichtigung der Kostenstrukturen in Abhängigkeit von n, r und c in analoger Weise erfolgen, wie es in Abhängigkeit von jedem Versuchsplan $v = (n, k, t_0) \in V$ durch die Bayessche Risikofunktion $r\big((\tau, \nu), (d(\cdot, v), v)\big)$ geschieht. Dies führt zu der den Beziehungen (28) bis (32) entsprechenden Bayesschen Risikofunktion $\bar{r}\big((\nu, \tau), (n, r, c)\big)$ dergestalt:

$$\left.\begin{aligned} &\forall n \in \{1, 2, \ldots\}\ \forall r \in \{1, \ldots, n\}\ \forall c \in \boldsymbol{R}^+ - \{0\}: \\ &\bar{r}\big((\tau, \nu), (n, r, c)\big) = k_{\mathrm{p}} E_{(\tau,\nu)}\bar{B}(n, r) + k_{\mathrm{E}} n + \\ &\qquad + (M - n)\,\{k_{\mathrm{I}} + (k_{\mathrm{A}} - k_{\mathrm{I}})\,(1 - I_s(r, \nu)) \\ &\qquad - k_{\mathrm{A}} \left(\frac{\tau}{\tau + 1}\right)^{\nu} (1 - I_t(r, \nu))\} \end{aligned}\right\} \tag{48}$$

mit

$$E_{(\tau,\nu)}\,\bar{B}(n, r) := T_0\,\frac{\tau}{\nu - 1} \sum_{i=0}^{r-1} \frac{1}{n - i} \qquad (\nu \neq 1!)\,,$$

$$s := \frac{cr}{cr + T_0 \cdot \tau}\,, \qquad t := \frac{cr}{cr + T_0(\tau + 1)}$$

und

$$I_x(r, \nu) := \frac{1}{B(r, \nu)} \int_0^x z^{r-1}\,(1 - z)^{\nu-1} \mathrm{d}z \quad (0 \leqq x \leqq 1)\,,$$

$$B(r, \nu) := \int_0^1 z^{r-1}\,(1 - z)^{\nu-1}\,\mathrm{d}z \text{ (Betafunktion)}$$

(vgl. [4], Gln. (10), (11), (48)).
Die Risikofunktion (48) liefert mit den Beziehungen (39), (41) und (44):

$$\bar{r}\big((10{,}2), (12{,}6{,}773)\big) \approx 337{,}04\ [\mathrm{TM}] \tag{49}$$

und $E_{(10,2)}\bar{B}(12{,}6) \approx 1960$ [h].

Die zu erwartenden Kosten von rund 337 [TM] verteilen sich zu 134 [TM] auf die Prüfung und mit 203 [TM] auf die Entscheidung.
Man erkennt hieraus deutlich, daß an der Kostenfunktion (37) nicht nur zu bemängeln ist, daß durch sie die Entscheidungskosten unberücksichtigt bleiben, sondern auch, daß die Versuchskosten erheblich unterschätzt werden (vgl. Gl. (40)).
Insgesamt gesehen ergibt der Vergleich der Ergebnisse (45) (47) und (49), daß man mit dem Prüfplan (12, 0, 6) und dem Annahmekriterium $c = 773$ [h] weit entfernt ist von einem kostenoptimalen Beobachtungs- und Entscheidungsverfahren. Selbst wenn man auf eine Prüfung völlig verzichten und „auf gut Glück" entscheiden würde, wäre dann die „falsche" Entscheidung immer noch kostengünstiger. Dagegen würde die Anwendung der Bayesschen Beobachtungsstrategie $(d(\cdot, \hat{v}), \hat{v})$ mit dem Versuchsplan $\bar{v} = (11, 12, 180)$ gegenüber dem in [1] vorgeschlagenen Verfahren der Erwartung nach rd. 88 [TM] einsparen und nur etwa ein Dreizehntel der Prüfzeit beanspruchen. Es könnte der Verdacht entstehen, daß unser Beispiel so konstruiert wurde, daß die Lösung aus [1] besonders schlecht abschneidet. Das ist nicht der Fall. In anderen Beispielen zeigen sich ähnliche Tendenzen. Außerdem kam es den Autoren nicht

darauf an, zu zeigen, daß die Vorgehensweise aus [1] im Einzelfall zu mehr oder weniger schlechten Ergebnissen führt, sondern es sollte vielmehr demonstriert werden, daß die die Kostenentwicklung maßgeblich beeinflussenden Faktoren wie die ökonomischen Konsequenzen der zur Auswahl stehenden Entscheidungen und die verfügbaren Vorkenntnisse über den entscheidenden Naturparameter weder in [1] noch durch die TGL 26096 Beachtung finden.
Gerade die Einbeziehung von Vorkenntnissen verringert sehr oft in erheblichem Maße den notwendigen Prüf- und Kostenaufwand.

Literatur

[1] *Schmidt, F.:* Zuverlässigkeitsprüfungen – was kosten sie? msr 22 (1979) H. 3, S. 136–141.

[2] TGL 25096/06, Ausgabe 4/76: Zuverlässigkeit in der Technik, Ausfallterminierte Prüfpläne, Basis Exponentialverteilung.

[3] *Barlow, R. E.; Proschan, F.:* Statistische Theorie der Zuverlässigkeit, Wahrscheinlichkeitstheoretische Modelle. Berlin: Akademie-Verlag 1978.

[4] *Thyregod, P.:* Bayesian Single Sampling Plans for Life-testing with Truncation of the Number of Failures. Scandinavian Journal of Statistics, Vol. 2 (1975) No. 2, pp. 61–70.

msr 7528

Dipl.-Phys. *R. Endter* und Dipl.-Ing. *H. Töpfer*, Jena[1])

Messung der spektralen Rauschdichte von Operationsverstärkern mit Lock-in-Technik

IA 3.1.1.

0. Einleitung

Rauschquellen werden durch die Autokorrelationsfunktion der Rauschgröße bzw. deren Fourier-Transformierter, der spektralen Leistungsdichte (Leistungsspektrum) $S(f)$, beschrieben. Die meßtechnische Ermittlung solcher Spektren erfolgt im allgemeinen mit Spektrometern, deren prinzipieller Aufbau im Bild 1 dargestellt ist. Als durchstimmbarer Bandpaß kommen dabei Filter konstanter relativer Bandbreite zur Anwendung, die eine Korrekturrechnung zur Bestimmung der auf eine Bandbreite von 1 Hz normierten spektralen Rauschleistungsdichte erfordern [1] und [2].
Trotz vieler Vorteile dieser Spektralanalysatoren erschwert jedoch die in Abhängigkeit von der Bandmittenfrequenz sich ändernde absolute Filterbandbreite das Erkennen von Feinheiten im Spektrum. Insbesondere trifft dies auf die Messung von Rauschspektren am Ausgang frequenzabhängiger Übertragungsglieder, wie Bandpaß, Resonanzkreis usw., zu.
Diese Schwierigkeit ließe sich bei Verwendung eines durchstimmbaren Filters konstanter absoluter Bandbreite umgehen. Technisch realisieren läßt sich ein solches Filter jedoch nur für einen relativ schmalen Frequenzbereich (etwa 2 Frequenzdekaden) mit ausreichender Genauigkeit. Wesentlich vorteilhafter ist jedoch die Verwendung eines Tiefpaßfilters mit einstellbarer Grenzfrequenz, in dessen Übertragungsband nun allerdings der auszumessende Spektralbereich transformiert werden muß. Eine solche Transformation ergibt sich z. B. bei der linearen Modulation, d. h. bei der Multiplikation des Rauschspektrums mit einem Trägersignal, dessen Frequenz einstellbar sein muß. In nahezu idealer Weise wird ein solches Prinzip im Lock-in-Verstärker realisiert (Bild 2). Der Effektivwert des Lock-in-Ausgangssignals ist dann der Quadratwurzel aus dem Leistungsspektrum der Rauschquelle proportional.

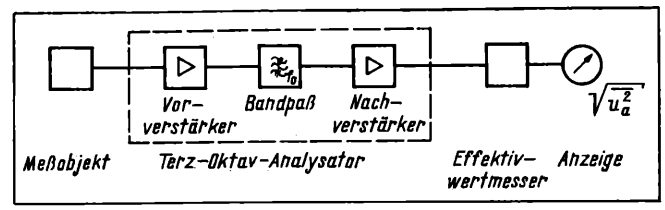


Bild 1. Wirkungsschema eines Spektralanalysators konstanter relativer Bandbreite

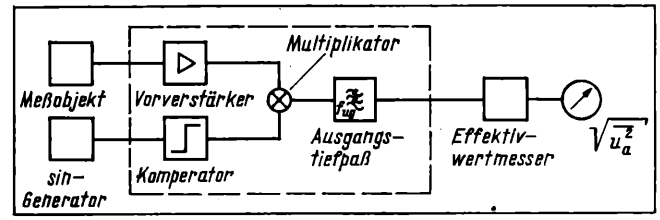


Bild 2. Wirkungsschema eines Spektralanalysators konstanter absoluter Bandbreite

1. Signaltheoretische Beschreibung der Lock-in-Messung von Rauschspektren

Lock-in-Detektoren enthalten rauscharme Vorverstärker mit kalibrierter Verstärkung und Bandbreite. Sie eignen sich deshalb sehr gut für absolute Rauschspannungsmessungen. Nach Verstärkung der Eingangsrauschspannung $\overline{u_r^2}$ (charakterisiert durch die Leistungsdichte $S_u(f)$) wird diese im Takt der Nulldurchgänge einer harmonischen Referenzfrequenz f_0 umgepolt, oder, was dem entspricht, mit einer Rechteckschwingung der Frequenz f_0 multipliziert.
Nach der dabei erfolgten Frequenztransformation sorgt ein Ausgangstiefpaß dafür, daß nur diejenigen Frequenzkomponenten an den Ausgang des Gerätes übertragen werden, die maximal einen durch die Tiefpaßgrenzfrequenz f_{go} vorgegebenen Abstand von der Frequenz $f = 0$ haben.
Aus der Signaltheorie ist bekannt, daß der Multiplikation im Zeitbereich eine Faltung der zugehörigen Spektralfunktionen entspricht. Das Spektrum der von der Referenzfrequenz abgeleiteten Rechteckschwingung läßt sich unter Verwendung der symbolischen Schreibweise $\mathcal{F}\{...\}$ für die Fourier-Integraltransformation als Stoßfolge formulieren:

$$\mathcal{F}\{\operatorname{sgn}(\sin 2\pi f_0 t)\} = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{2}{\pi} \frac{(-1)^n}{(2n+1)} \delta(f - (2n+1)f_0)$$

mit

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & \text{für } x \geqq 0 \\ -1 & \text{für } x < 0 \end{cases} \quad (\delta(f) - \text{Diracsche Deltafunktion}).$$

[1]) Mitteilung aus der Friedrich-Schiller-Universität Jena, Sektion Technologie für den wissenschaftlichen Gerätebau.

Die Rauschleistungsdichte $S_a(f)$ am Ausgang des Lock-in bestimmt sich danach zu:

$$S_a(f) = |H_{Tp}(f)|^2 \{S_u(f) * |\mathcal{F}\{\mathrm{sgn}(\sin 2\pi f_0 t)\}|^2\}$$

$$= \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_{g0}}\right)^2} \times$$

$$\times \left\{S_u(f) * \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{4}{\pi^2} \frac{1}{(2n+1)^2} \delta(f - (2n+1) f_0)\right\} =$$

$$= \frac{4}{\pi^2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \frac{1}{(2n+1)^2 \left\{1 + \left[\frac{f - (2n+1) f_0}{f_{g0}}\right]^2\right\}} \times$$

$$\times S_u(f - (2n+1) f_0). \quad (1)$$

$H_{Tp}(f)$ Übertragungsfunktion des Ausgangstiefpasses 1. Ordnung; * symbolisiert die Faltungsoperation

Daraus ergibt sich für den quadratischen Effektivwert der Ausgangsspannung

– bei weißem Rauschen ($S_u(f) = \frac{1}{2} S_0 = \text{konst.}$):

$$\overline{u_a^2} = \int_{-\infty}^{+\infty} S_a(f)\, df = \tfrac{1}{2} \pi f_{g0} S_0 \quad (2)$$

– bei $1/f$-Rauschen $\left(S_u(f) = \frac{1}{2} S_F = S(f') \frac{f'}{f}\right.$, wobei i. allg. $\left.f' = 1\ \text{Hz}$ gewählt wird$\right)$:

$$\overline{u_a^2} = \frac{1}{2} \pi \cdot c f_{g0} S_F;\ c \approx 0{,}853\,. \quad (3)$$

S_0, S_F „technische" Spektraldichten.

In den seltensten Fällen werden jedoch geeignete Efffektivwertmesser zur Verfügung stehen, die in der Lage sind, die erforderlichen großen Zeitkonstanten für die Erfassung der vom Lock-in in den Niedrigstfrequenzbereich transformierten Rauschanteile zu verarbeiten. Wird die Hochpaßwirkung infolge der bei NF-Effektivwertmessern üblichen internen Wechselspannungsgegenkopplung durch ein Hochpaßverhalten 1. Ordnung angenähert:

$$H_{Hp}(f) = \frac{1}{1 - j \frac{f_{gu}}{f}} \quad (f_{gu}\ \text{untere Grenzfrequenz}), \quad (4)$$

so führt dies zu einem Korrekturwert bei der Berechnung des Effektivwertes:

$$\overline{u_a^2} = \frac{1}{2} \pi S_0 f_{g0}^2 \frac{1}{f_{g0} + f_{gu}} \quad (2a)$$

bzw.

$$\overline{u_a^2} = \frac{1}{2} \pi c S_F f_{g0}^2 \frac{1}{f_{g0} + f_{gu}}. \quad (3a)$$

Die Spannung am Anzeigeinstrument setzt sich aus dem quadratischen Mittelwert und einem stochastischen Anteil zusammen. Aus diesem Grunde sind Maßnahmen zu treffen, die die Zeigerschwankungen in Grenzen halten. Der Zusammenhang zwischen dem Erwartungswert und dem Schwankungsquadrat von u_a ergibt sich für gaußverteiltes Rauschen [1]:

$$\frac{(u_a - \overline{u_a})^2}{\overline{u_a^2}} = \frac{\tau_{Tp}}{\tau_{In}}.$$

τ_{Tp} Zeitkonstante des Tiefpasses am Lock-in-Ausgang; τ_{In} Zeitkonstante des Anzeigeinstrumentes vom Effektivwertmesser

Um eine gute Ablesbarkeit des Meßwertes zu sichern, sollte $\tau_{In} \approx (10^2 \ldots 10^3)\, \tau_{Tp}$ betragen.

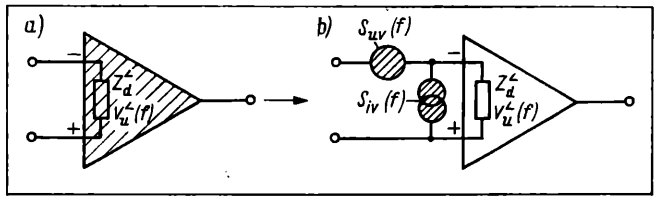


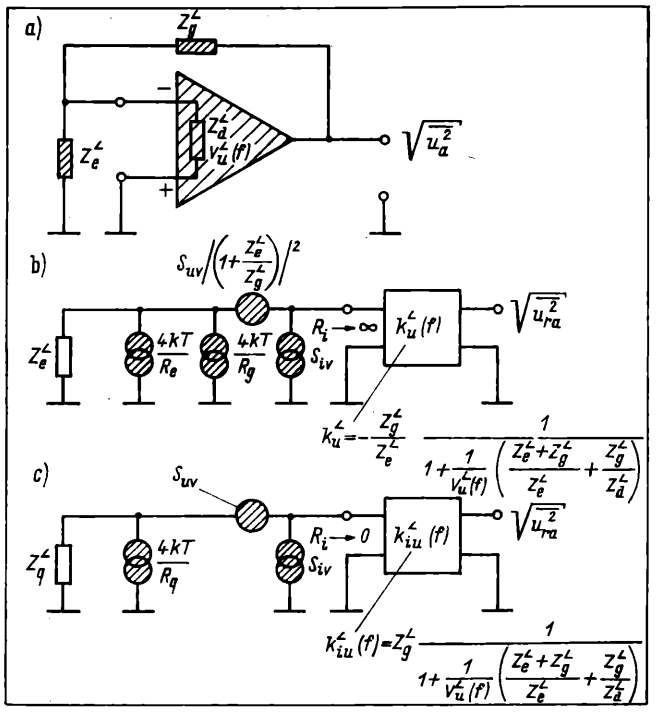
Bild 3. Rauschersatzschaltbild integrierter Schaltungen
a) rauschender Operationsverstärker; b) rauschfreier Operationsverstärker (Z_d differentieller Eingangswiderstand des OV)

Steht kein geeigneter Effektivwertmesser zur Verfügung, so genügt unter Umständen bereits die Verwendung eines den Gleichstrommittelwert anzeigenden Instruments. Zuvor muß allerdings der Betrag der Eingangsgröße gebildet werden. Gaußsches Rauschen vorausgesetzt, ist dann lediglich noch zu beachten, daß sich der Effektivwert der Rauschgröße aus dem 1,13-fachen Anzeigewert bestimmt [3]. Die untere Grenzfrequenz dieser Meßeinrichtung wirkt sich in der bereits dargelegten Form auf die Berechnung der Rauschspektraldichte aus.

2. Rauschdichtemessung an linearen integrierten Schaltungen — mathematische Grundlagen

Das Rauschen linearer integrierter Schaltungen (IS) wird in bekannter Weise [4] und [5] mit Hilfe einer Rauschspannungs- und einer Rauschstromquelle am Eingang der nun rauschfrei gedachten Verstärkerschaltung mit dem komplexen Frequenzgang $v_u^<(f)$ beschrieben (Bild 3). In guter Näherung sind die beiden Rauschquellen nicht miteinander korreliert. Zur Gewährleistung eines stabilen Betriebsverhaltens wird die IS für die Messung der Rauschquellenspektraldichten $S_{uv}(f)$ bzw. $S_{iv}(f)$ in einer Gegenkopplungsschaltung betrieben (Bild 4a). Das am Ausgang dieser Anordnung auftretende mittlere Rauschspannungsquadrat ermittelt sich unter Berücksichtigung der von den Realteilen der komplexen Beschaltungswiderstände $Z_e^<$ und $Z_g^<$ herrührenden

Bild 4. Rauschersatzschaltung eines gegengekoppelten Operationsverstärkers
a) Gegenkopplung mit rauschenden Beschaltungswiderständen; b) Ersatzschaltbild gemäß Gl. (5a); c) Ersatzschaltbild gemäß Gl. (5b)



thermischen Rauschstromspektren $S_{th} = 4\,kT/R$ zu

$$\overline{u_{ra}^2} = \int_0^\infty \left\{\left[4kT\left(\frac{1}{R_e}+\frac{1}{R_g}\right)+S_{iv}(f)\right]\times \right.$$
$$\times Z_e^2 + S_{uv}(f)\left|1+\frac{Z_e^<}{Z_g^<}\right|^2\Bigg\}\times$$
$$\times \frac{Z_g^2}{Z_e^2}\frac{\mathrm{d}f}{\left|1+\frac{1}{v_u^<(f)}\left(\frac{Z_e^<+Z_g^<}{Z_e^<}+\frac{Z_g^<}{Z_d^<}\right)\right|^2} \qquad (5a)$$

bzw. mit $\frac{1}{R_q}=\frac{1}{R_e}+\frac{1}{R_g}$ zu

$$\overline{u_{ra}^2} = \int_0^\infty \left\{\frac{4kT}{R_q}+S_{iv}(f)+\frac{S_{uv}(f)}{Z_q^2}\right\}\times$$
$$\times Z_g^2 \frac{\mathrm{d}f}{\left|1+\frac{1}{v_u^<(f)}\left(\frac{Z_e^<+Z_g^<}{Z_e^<}+\frac{Z_g^<}{Z_d^<}\right)\right|^2} \qquad (5b)$$

wobei $Z_q^2 = |Z_g^<|\,|Z_e^<|^2$. Je nachdem, ob $Z_e^<$ in das Gegenkopplungsnetzwerk des Verstärkers einbezogen wird oder nicht, wird eine Summe von Rauschspannungsdichten mit Hilfe der realen Übertragungsfunktion des gegengekoppelten Spannungsverstärkers oder eine Summe von Rauschstromdichten mit der realen Übertragungsfunktion eines Strom-Spannungs-Wandlers in die Ausgangsrauschspannung überführt. Diesen beiden Fällen entsprechen die in den Bildern 4b bzw. 4c angegebenen Ersatzschaltbilder.

Wird durch geeignete Wahl der Beschaltungsimpedanzen erreicht, daß in $\overline{u_{ra}^2}$ entweder der Einfluß von $S_{uv}(f)$ bzw. $S_{iv}(f)$ dominiert, so läßt sich die eingangs beschriebene Methode zur spektralen Messung der Rauschdichten nutzen. Mit

$$v_u^<(f) = \frac{v_{uo}}{1+j\frac{f}{f_{gv}}} \quad \text{mit} \quad v_{uo} \gg 1 \qquad (6)$$

v_{uo} die Leerlaufgleichspannungsverstärkung; f_{gv} $3dB$-Grenzfrequenz des nichtgegengekoppelten Verstärkers

sowie

$$Z_g^< = R_g \left\| \frac{1}{j2\pi f C_g} \right. = \frac{R_g}{1+j\frac{f}{f_g}} \quad \text{mit} \quad f_g = \frac{1}{2\pi R_g C_g};$$

entsprechend

$$Z_e^< = \frac{R_e}{1+j\frac{f}{f_e}}; \qquad Z_d^< = \frac{R_d}{1+j\frac{f}{f_d}}$$

und

$$Z_q^< = \frac{R_q}{1+j\frac{f}{f_q}} \quad \text{mit} \quad C_q = C_g + C_e$$

läßt sich die Spektraldichte der Ausgangsrauschspannung schreiben zu

$$S_{ua}(f) = \frac{\mathrm{d}\overline{u_{ra}^2}}{\mathrm{d}f} =$$
$$= \left\{S_{iv}(f)\,R_g^2 + 4kTR_g\left(1+\frac{R_g}{R_e}\right)+S_{uv}(f)\times\right.$$
$$\left.\times\left(1+\frac{R_g}{R_e}\right)^2\left(1+\frac{f^2}{f_q^2}\right)\right\}\cdot K(f) \qquad (7)$$

mit

$$K(f) = \frac{1}{\left[1-\frac{f^2}{v_{uo}f_{gv}f_g}+\frac{R_g}{v_{uo}R_e}\left(1-\frac{f^2}{f_{gv}f_e}\right)+\frac{R_g}{v_{uo}R_d}\left(1-\frac{f^2}{f_d f_{gv}}\right)\right]^2+\left[\frac{f}{f_g}\frac{f}{v_{uo}f_{gv}}+\frac{R_g}{v_{uo}R_e}\left(\frac{f}{f_e}+\frac{f}{f_{gv}}\right)+\frac{R_g}{v_{uo}R_d}\left(\frac{f}{f_d}+\frac{f}{f_{gv}}\right)\right]^2}.$$

Für die Messung der Rauschdichtespektren im Frequenzbereich bis 100 kHz ergeben sich danach folgende Aussagen:

1. Messung von $S_{uv}(f)$:

Der Gegenkopplungswiderstand wird durch einen direkten Kurzschluß zwischen Verstärkerausgang und -eingang ersetzt, d. h. $R_g \to 0$. Damit folgt:

$$S_{ua} \approx S_{uv}\cdot K(f). \qquad (8)$$

Obwohl man sich häufig bei der Bestimmung von S_{uv} auf diese Meßbedingung bezieht (z. B. [6]), ist dies nicht zu empfehlen, da nicht immer vorhandene, extrem rauscharme Eingangsverstärker des nachfolgenden Spektralanalysators erforderlich werden. Sehr viel günstiger ist die Wahl einer niederohmigen Verstärkerbeschaltung, wobei $R_g \gg R_e$ gelten muß:

$$S_{ua} \approx \left\{S_{iv}R_g^2+\left(1+\frac{R_g}{R_e}\right)\left[4kTR_g+S_{uv}\left(1+\frac{R_g}{R_e}\right)\right]\right\}\times$$
$$\times K(f) \approx \left\{S_{iv}R_g^2+\frac{R_g}{R_e}\left(4kTR_g+S_{uv}\frac{R_g}{R_e}\right)\right\}\cdot K(f).$$

Für $S_{uv} \gg 4kTR_e$ sowie $S_{uv} \gg S_{iv}R_e^2$ (i. allg. für $R_e < 100\,\Omega$ bei IS sicher erfüllt), folgt

$$S_{ua} \approx S_{uv}\frac{R_g^2}{R_e^2}\cdot K(f). \qquad (9)$$

Durch geschickte Wahl von R_g und R_e kann somit unter Ausnutzung der Verstärkereigenschaften des Meßobjektes stets eine ausreichend große Ausgangsrauschdichte erzielt werden.

2. Messung von $S_{iv}(f)$:

– Für die Messung der Rauschstromdichte ist $R_e \gg R_g$ ($R_g \neq 0$) zu wählen. Damit wird:

$$S_{ua} \approx \{S_{iv}R_g^2 + 4kTR_g + S_{uv}\}\cdot K(f).$$

Durch geeignete Wahl von R_g kann stets erreicht werden, daß $S_{iv}R_g^2$ gegenüber den beiden anderen Termen überwiegt. Die Rauschdichte am Ausgang der IS wird in diesem Fall ausschließlich durch die Rauschstromquelle des Verstärkers bestimmt:

$$S_{ua} \approx S_{iv}R_g^2\cdot K(f). \qquad (10)$$

Bei der Messung an linearen IS mit bipolaren Eingangsstufen sind für R_g Werte von etwa 1 MΩ ausreichend, während bei FET-Eingangsstufen 1 ... 10 GΩ erforderlich sind ($R_g \gg 4kT/S_{iv}$).

– Der danach für die Messung der Rauschstromdichte von FET-Verstärkern benötigte hohe Quellenwiderstand von 10 ... 100 GΩ ist zweckmäßigerweise durch Verwendung einer verlustarmen Kapazität zu realisieren [3].

Mit $Z_e^< \approx \frac{1}{j\omega C_e}$ folgt nun aus Gl. (7)

$$S_{ua} \approx \{S_{iv}(f)\,R_g^2 + S_{uv}(f)\,[1+(2\pi f R_g C_e)^2]\}\frac{1}{1+\left(\frac{f}{f_g}\right)^2} \approx$$
$$\approx S_{iv}(f)\frac{R_g^2}{1+\left(\frac{f}{f_g}\right)^2}. \qquad (10a)$$

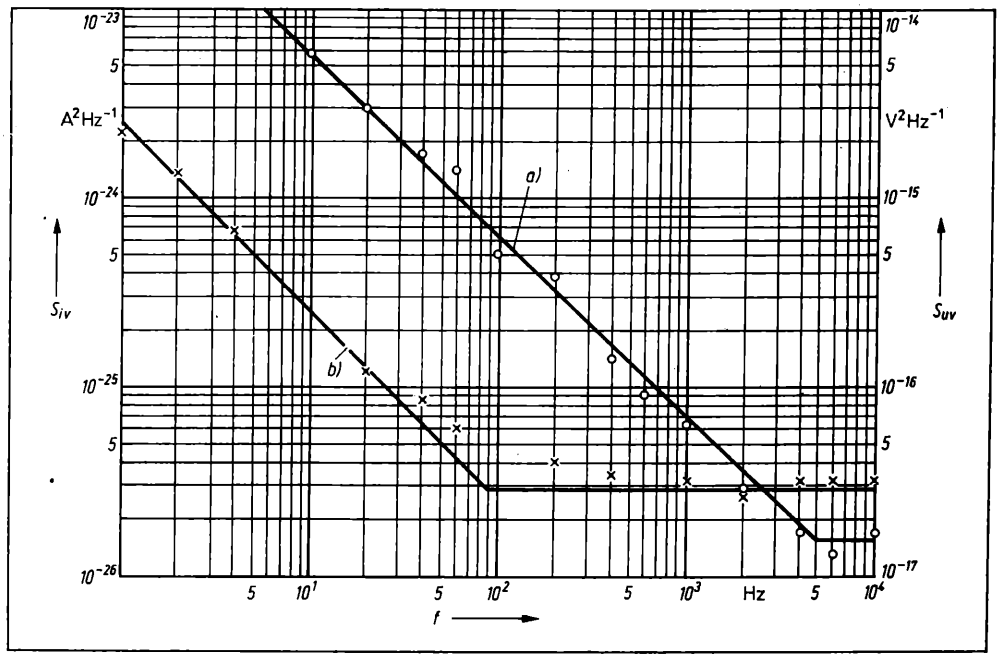


Bild 5. Rauschspektren der IS B 109
a) Rauschstromdichte S_{iv}; b) Rauschspannungsdichte S_{uv}

Wegen $\omega^2 R_g^2 C_e^2 S_{uv} \leqq S_{iv} R_g^2$ ergibt sich mit $C_e = 56$ pF und $R_g = 220$ MΩ ein Spektralmeßbereich bis maximal 1 kHz. Dabei wurde vorausgesetzt, daß der für S_{iv} zu erwartende kleinstmögliche Wert durch das Schrotrauschen der Gateleckströme der Eingangstransistoren bestimmt wird [3]:

$$S_{iv} \approx 2e(|I_{g1}| + |I_{g2}|) . \tag{11}$$

e Elementarladung

(Trotz der Wahl eines relativ niederohmigen R_g tritt der von S_{iv} verursachte Anteil noch signifikant in der Ausgangsrauschspannung in Erscheinung! Die Inkohärenz der Rauschsignale ermöglicht jedoch noch die Bestimmung von S_{iv} durch Subtraktion der thermischen Rauschleistungsdichte von der gemessenen Rauschleistungsdichte der Ausgangsspannung.)

3. Meßergebnisse

Die im vorigen Abschnitt abgeleiteten Meßbedingungen wurden bei der experimentellen Bestimmung der spektralen Leistungsdichten von den äquivalenten Eingangsrauschstromquellen und -spannungsquellen der Operationsverstärker B 109 sowie K 140 UD 8A (FET-Eingangsstufe) eingehalten. Der Lock-in „Typ 232B" (UNIPAN, VR Polen) in Verbindung mit einem QRV 2 (Meßelektronik „Otto-Schön", DDR) als echtem Effektivwertmesser, diente als Spektrometer konstanter absoluter Bandbreite. Die Zeitkonstante des Tiefpasses am Lock-in-Ausgang wurde zu 0,03 s gewählt. Für die untere Grenzfrequenz des Effektivwertmessers ergab sich ein Wert von 0,7 Hz.

Aus den gemessenen Rauschspannungseffektivwerten wurden mit Hilfe der Gln. (2a), (3a), (9) und (10) die im Bild 5 bzw. Bild 6 angegebenen spektralen Leistungsdichten ermittelt. Für den K 140 ist die aufgrund der gemessenen Gateleckströme ($|I_{g1}| \approx |I_{g2}| = 27{,}8$ pA) zu erwartende Dichte des Schrotrauschstromes mit dargestellt (Bild 6).

Paralleluntersuchungen mit einem Filter konstanter relativer Bandbreite (Terz-Oktav-Filter „TOA 111", VEB Robotron, Meßelektronik „Otto Schön", DDR) bestätigen die erhaltenen Ergebnisse.

(Fortsetzung auf Seite 336)

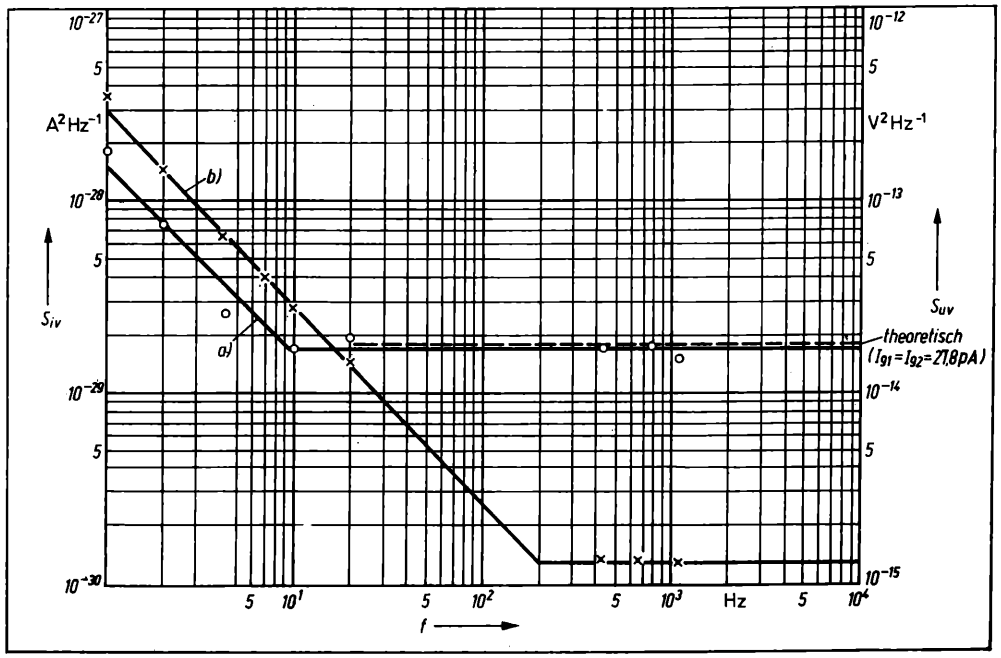


Bild 6. Rauschspektren der IS K 140 UD 8A
a) Rauschstromdichte S_{iv}; b) Rauschspannungsdichte S_{uv}

Ing.-oec. *J. Dunkel*, Berlin [1])

Aufgabenstellung und Inhalt der Applikation elektronischer Bauelemente und die Stellung des VEB Applikationszentrum Elektronik Berlin (AEB) im Applikationsprozeß

IA 4.0.1.

1. Ausgangspunkte

Mit der vom X. Parteitag der SED beschlossenen Fortsetzung der Verwirklichung der Hauptaufgabe in seiner Einheit von Wirtschafts- und Sozialpolitik im Entwicklungsabschnitt der 80er Jahre werden neue, höhere Anforderungen an die Leistungskraft unserer Volkswirtschaft gestellt. Deshalb ist es erforderlich, eine ökonomisch wirksamere Stufe der sozialistischen Rationalisierung zu erreichen. Diese neue Etappe ist dadurch gekennzeichnet, daß die Anwendung der neuesten Erkenntnisse aus der Entwicklung der Produktivkräfte, aus den Entwicklungstendenzen der Technologien und Verfahren, verbunden mit der Bereitstellung hochmoderner Produktionsausrüstungen, umfassend und konsequent durchgesetzt werden muß.

Im Zentrum der ökonomischen Strategie steht damit die Notwendigkeit, einen neuen Schritt bei der Verbindung der Vorzüge des Sozialismus mit den Errungenschaften der wissenschaftlich-technischen Revolution zu tun. Die Entwicklung der DDR zu einem modernen sozialistischen Industriestaat wird immer mehr vom wissenschaftlich-technischen Fortschritt geprägt. Damit kommt der Wissenschaft in wachsendem Maße eine neue Rolle zu: sie hat die Wirtschaftskraft zu stärken und einen maßgeblichen Beitrag zur Erhöhung des Lebensniveaus der Werktätigen zu leisten.

Die Möglichkeiten der wissenschaftlich-technischen Revolution werden in den 80er Jahren unmittelbar zur Hauptreserve für Leistungswachstum und Effektivität unserer Volkswirtschaft. Deshalb wird auf die beschleunigte Entwicklung und Anwendung der volkswirtschaftlich bestimmenden technologischen Grundlinien orientiert, wie

- beschleunigte Entwicklung und Produktion sowie umfassende Anwendung der Mikroelektronik
- elektronische Steuerungs- und Rechentechnik
- Einsatz von Handhabetechniken und Industrierobotern
- hochproduktive Verfahren zur besseren stoffwirtschaftlichen Nutzung von Erdöl, Erdgas und Braunkohle
- Veredlung in der Chemie
- Ausbau der Kernenergie.

Im internationalen Maßstab waren die letzten Jahre durch eine schnelle Weiterentwicklung der Halbleitertechnik/Mikroelektronik gekennzeichnet. Ausschlaggebend ist, daß sich die Mikroelektronik in zunehmendem Maße als Schlüssel zur Lösung vielfältiger Aufgaben in fast allen Bereichen der Volkswirtschaft anbietet. Daraus abgeleitet ergibt sich für den Industriebereich Elektrotechnik/Elektronik die Aufgabe, zur umfassenden Sicherung der Anwendung der Mikroelektronik im Maßstab der DDR ein abgestimmtes Sortiment von mikroelektronischen Bauelementen zur weiteren spürbaren Erhöhung des Automatisierungsgrades, zur Verbesserung des Informationsaustausches und zur Verarbeitung großer Datenmengen in der Volkswirtschaft und in anderen gesellschaftlichen Bereichen bereitzustellen.

Von der schnellen Entwicklung, Produktion und Anwendung der Mikroelektronik hängt somit entscheidend die weitere Effektivität der Volkswirtschaft der DDR ab. Sie bildet einen Kernpunkt der sozialistischen Entwicklung aus gesamtvolkswirtschaftlicher Sicht, sie ist Kernstück der sozialistischen Rationalisierung.

Rolle und Bedeutung der Mikroelektronik für die Volkswirtschaft der DDR wurden auf der 6. Tagung des ZK der SED im Juni 1977 umfassend behandelt. Abgeleitet daraus wurden für den Industriebereich Elektrotechnik/Elektronik die notwendigen Festlegungen getroffen und Maßnahmen eingeleitet. Besonders auf dem Gebiet der Applikation elektronischer Bauelemente war es notwendig, die Grundaufgaben zur Organisation und Durchführung der Applikation elektronischer Bauelemente und zur Sicherung der Bauelementebereitstellung für Forschungs- und Entwicklungsaufgaben festzulegen. Die fixierten Ziele und Aufgaben gehen bezüglich des inhaltlichen Anliegens weit über die herkömmlichen Auffassungen zum Inhalt des Applikationsbegriffes hinaus.

2. Applikation unter sozialistischen Produktionsverhältnissen

Man geht davon aus, daß die Durchsetzung der wissenschaftlich-technischen Revolution in hohem Maße die Dynamik der zwischenbetrieblichen Kooperation, Koordinierung und Konzentration beeinflußt und verstärkt. Daraus leitet sich ab, daß die Applikation unter sozialistischen Produktionsverhältnissen

- ein wissenschaftsorganisatorisches Element der Leitung, Planung und Organisation zwischenbetrieblicher Kooperationsbeziehungen ist, mit dem Ziel, den wissenschaftlich-technischen Höchststand in allen am Applikationsprozeß beteiligten Insdutriezweigen und wissenschaftlichen Einrichtungen durchzusetzen.
  Damit wird die Applikation vor allem auch ein Leitungsinstrument zur Organisierung der wechselseitigen Information über mögliche und bereits erforschte Anwendungsrichtungen und -beispiele bzw. deren arbeitsteilige Erarbeitung
- durch frühzeitige und eindeutige Entscheidungen zum einsetzbaren (d. h. gegenwärtig zulässigen und perspektivisch

[1]) Mitteilung aus dem VEB Applikationszentrum Elektronik Berlin im VEB Kombinat Mikroelektronik.
Der Beitrag ist aus Gründen einer möglichst breiten Publizierung der Applikationsproblematik in ähnlicher Form auch in zahlreichen anderen einschlägigen Zeitschriften der DDR erschienen.

(Fortsetzung von Seite 335)

Literatur

[1] *Bittel, H.; Storm, L.:* Rauschen. Westberlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1971.
[2] *Broch, J. T.:* Messungen von mechanischen Schwingungen und Stößen. Brüel & Kjear-Firmenschrift 1970.
[3] *Motchenbacher, D. C.; Fritchen, F. C.:* Low-Noise electronic design. New York: John Wiley & Sons 1973.
[4] *Bladowski, A.:* Integrierte Analogschaltungen. RCA-Mitteilungen.
[5] *Herpy, M.:* Analoge integrierte Schaltungen. Budapest: Akadémiai Kiadó 1979.
[6] *Kühnel, C.:* Untersuchung des Eigenrauschens von Operationsverstärkern. rfe 29 (1980) H. 12, S. 758–759.
[7] *Moritz, R.:* Rauschuntersuchungen an HL-Strahlungsdetektor-Verstärkeranordnungen. Diplomarbeit, FSU Jena 1982.

msr 7582

verfügbaren) Sortiment elektronischer Bauelemente in den Neu- und Weiterentwicklungen der Geräteindustrie die komplexe und wechselseitig abgestimmte Entwicklung, Anwendungsvorbereitung und Produktion von Erzeugnissen der Geräte- und Bauelemente-Industrie durchsetzen muß. Das beginnt mit der Applikationsforschung und endet mit der Versorgung der F/E-Themen der Anwenderindustrie mit Bauelementen. Dazu gehört die Erfassung der derzeitigen und künftigen Anwenderbedürfnisse nach Qualität und Quantität zur Vorbereitung von Leitungsentscheidungen zur Gestaltung des perspektivisch notwendigen Bauelementesortiments, neuer Technologien, Verfahren und Ausrüstungen

- die konkrete Vermittlung der notwendigen Information über technische Eigenschaften und Merkmale der Bauelemente beinhaltet, über die der Anwender von sich aus im allgemeinen nicht verfügt, die aber zur Entscheidungsvorbereitung bei der Ausarbeitung des Planes Wissenschaft und Technik benötigt wird. Das betrifft sowohl die wissenschaftlich-technische als auch die technisch-kommerzielle Beratung und die Qualifizierung (Weiterbildung) der Anwender. Dazu zählt die Information über das verfügbare Bauelementesortiment und deren Einsatzmöglichkeiten, die Information und Beratung über bereits erforschte bzw. erprobte oder geplante und gespeicherte Anwenderlösungen und deren Anpassungsmöglichkeit (Nachnutzungen) oder Verallgemeinerungsfähigkeit. Dazu zählen auch Lieferbereitschaft, -fähigkeit, Quantität, Lieferzeiten, -preise u. a.
- die eigenständige bzw. mit dem Anwender gemeinsame Erarbeitung von schaltungstechnischen Lösungen bis zum Musterbau einschließlich Nachweis des ökonomischen Nutzens bzw. der Effektivität des Ergebnisses beinhaltet
- nicht zuletzt solche wichtige politisch-ideologische Aufgaben umfaßt, wie
  - den Erlaß von Anwenderverboten und -geboten zu elektronischen Bauelementen im staatlichen Auftrag, d. h. auf der Grundlage staatlicher Anordnungen, Verfügungen und Weisungen
  - Durchsetzung des Grundsatzes, nur das in der DDR gegenwärtig und perspektivisch verfügbare und für den Einsatz im jeweiligen Gerät bestätigte Bauelementesortiment aus DDR-Aufkommen und/oder aus RGW-Importen zu verwenden.

Die dem VEB Applikationszentrum Elektronik Berlin gestellte Aufgabe zur umfassenden, schnellen Anwendung der Mikroelektronik konzentriert sich, daraus abgeleitet, vorrangig auf 2 Schwerpunkte:

1. Es ist im Ergebnis der applikativen Arbeit sehr konkret Einfluß zu nehmen auf die schnelle Erweiterung und Erneuerung des für F/E-Aufgaben zulässigen und perspektivisch verfügbaren Bauelementesortiments durch die Erhöhung des Tempos in den bauelementeentwickelnden und -herstellenden Betrieben und Einrichtungen, und es ist die Ergänzung des Bauelementesortiments aus Eigenaufkommen durch Importe aus dem RGW durchzusetzen.
2. Es kommt darauf an, die schnellere und stärkere Wahrnehmung der eigenen Verantwortung der Anwender auf der Basis einer ständig steigenden Anwendungsbereitschaft und Anwendungsfähigkeit durch eine offensive progressive Applikation zu unterstützen — das betrifft vor allem die sogenannten Erstanwender der Mikroelektronik.

Für beide Schwerpunkte stellt die Applikation die Nahtstelle dar — besonders daraus erwächst ihr unter sozialistischen Produktionsverhältnissen eine sehr hohe und umfassende Verantwortung.

3. Volkswirtschaftliche Zielstellung der Applikation elektronischer Bauelemente

Die volkswirtschaftliche Zielstellung der Applikation elektronischer Bauelemente besteht, abgeleitet aus vorstehender inhaltlicher Definition, in der

- Sicherung des fortgeschrittenen internationalen Standes der Technik bei Geräten und Anlagen der Elektrotechnik und Elektronik auf der Grundlage der langfristigen Konzipierung, Entwicklung und des Einsatzes eines effektiven Sortiments elektronischer Bauelemente aus Eigenaufkommen der DDR und Importen aus den Ländern der sozialistischen Staatengemeinschaft
- Schaffung eines wissenschaftlich-technischen Vorlaufs bei der Bereitstellung elektronischer Bauelemente für die F/E-Aufgaben des elektronischen Geräte- und Anlagenbaus durch die gemeinsame Erarbeitung von komplexen Bedürfnisanalysen und Trendeinschätzungen auf der Grundlage und durch Verwirklichung langfristiger, stabiler Kooperationsbeziehungen zwischen der bauelementeherstellenden und -anwendenden Industrie
- Realisierung einer komplexen und abgestimmten Entwicklung, Produktion und Anwendungsvorbereitung von Erzeugnissen der elektronischen Geräte- und Bauelementeindustrie durch frühzeitige und eindeutige Entscheidungen zum perspektivisch verfügbaren und gegenwärtig einsetzbaren Sortiment elektronischer Bauelemenete in den Neu- und Weiterentwicklungen der Geräteindustrie und des Anlagenbaus.

Insgesamt geht es also darum, gewissermaßen parallel zu der Aufgabenstellung, neue diskrete und integrierte elektronische Bauelemente zu entwickeln und in die Produktion überzuleiten, bereits gezielt und abgestimmt mit der Entwicklung und Konstruktion von neuen Erzeugnissen des elektronischen Geräte- und Anlagenbaus zu beginnen. In der Beherrschung dieses komplex abgestimmten Miteinanders und Nebeneinanders — anstelle des Nacheinanders von Entwicklung, Produktion und Anwendung elektronischer Bauelemente, Geräte und Anlagen — liegt eine große Reserve, um das Entwicklungstempo in Wissenschaft, Technik und Produktion insgesamt zu beschleunigen. In der Aufdeckung dieser Reserve, dem Erkennen der damit verbundenen Probleme und dem Lösen der sich daraus ergebenden Aufgaben besteht das Grundanliegen der Applikation elektronischer Bauelemente. Mit der fortschreitenden Entwicklung der Mikroelektronik erhält die in den Plan einzuordnende Organisierung dieses Prozesses wachsende Bedeutung.
Zur Durchsetzung und Umsetzung der Aufgaben auf dem Gebiet der Applikation sind vom VEB Applikationszentrum Elektronik Berlin langfristige und stabile Kooperationsbeziehungen zu anderen Applikationsleitstellen und den F/E-Zentren der bauelementeanwendenden Kombinate und nicht zuletzt zu den Applikationsstellen der Betriebe im eigenen Kombinat herzustellen und zu vereinbaren.

4. Gestaltung und Nutzung der sozialistischen Gemeinschaftsarbeit und die Aufgaben der Beratungs- und Informationsstellen Mikroelektronik des VEB AEB in den Bezirken der DDR

Die Lösung der umfangreichen und vielschichtigen Aufgaben auf dem Gebiet der Applikation elektronischer Bauelemente erfordert, daß unter Führung des VEB Applikationszentrum Elektronik Berlin noch stärker als bisher eine enge leitungsmäßige und inhaltlich abgestimmte Zusammenarbeit zwischen den Leitern der F/E-Zentren bzw. der F/E-Stellen und den Applikationsstellen bzw. Bauelemente-Konsulenten der bauelementeanwendenden und -herstellenden Betriebe verwirklicht wird.

Zur Unterstützung des komplizierten Prozesses der Applikation wurden vom VEB Applikationszentrum Berlin im Auftrag des Ministers für Elektrotechnik und Elektronik mit aktiver Unterstützung der Bezirksleitungen der SED, der örtlichen Organe, der Trägerbetriebe und der Bezirksvorstände der KDT 1980/81 Beratungs- und Informationsstellen Mikroelektronik des VEB AEB in allen Bezirken der DDR aufgebaut.

Im Mittelpunkt der Aufgabenstellung der Beratungs- und Informationsstellen Mikroelektronik des VEB AEB steht die Organisierung einer breiten Anwendung der Mikroelektronik, insbesondere zur Lösung von Rationalisierungsaufgaben in den Betrieben des Territoriums (Bezirks). Bei der Verwirklichung dieser Zielstellung geht es in erster Linie darum, die Erstanwender der Mikroelektronik bei der Ermittlung und Nutzung effektiver mikroelektronischer Lösungen anzuleiten und zu unterstützen.

Das Ziel dieser konzentrierten Applikationstätigkeit besteht somit in der beschleunigten Erreichung und Sicherung des fortgeschrittenen internationalen Standes von Wissenschaft und Technik bei der Entwicklung von Erzeugnissen der Elektrotechnik und Elektronik und deren volkswirtschaftlich-ökonomischer Anwendung.

Die Lösung dieser für die Entwicklung der Volkswirtschaft bedeutungsvollen Aufgaben erfordert eine enge Zusammenarbeit mit den vorhandenen Konsultationspunkten Mikroelektronik und den Bezirksfachausschüssen (BFA) Mikroelektronik der KDT. Auf der Grundlage von abgestimmten Arbeitsplänen sind dazu Festlegungen zu treffen, auf welche staatlichen Aufgaben des Bezirksterritoriums sich die Beratungs- und Informationsstellen konzentrieren und in welcher Form und auf welche Aufgaben sich die Konsultationspunkte bzw. die Bezirksfachausschüsse Mikroelektronik mit den Mitteln der sozialistischen Gemeinschaftsarbeit orientieren sollen.

Die abgestimmmte Zusammenarbeit der staatlichen und gesellschaftlichen Organe zur Unterstützung der beschleunigten Anwendung der Mikroelektronik konzentriert sich somit auf die folgenden Komplexe:

- Beratung der Anwender über die Auswahl technisch günstiger Lösungen beim Einsatz der Mikroelektronik, beim Finden von Lösungen für Steuerung, Überwachung und Automatisierung von Produktionsprozessen mit Hilfe der Mikroelektronik:
  - Beratung mit dem Ziel, zunächst die Aufgaben zu formulieren, Prozeßanalysen anzufertigen und Studien auszuarbeiten, um dann zu konkreten Entwicklungsarbeiten übergehen zu können
  - Beratungen zu möglichen Entwicklungskapazitäten
  - Beratungen zur Anwendung der Mikroelektronik, zum Einsatz von elektronischen Rechnern und Steuerungen und zum Einsatz von Industrierobotern.
- Gezielte Information der Anwender über das in der DDR verfügbare Sortiment elektronischer Bauelemente, über Steuerungs-, Rechner- und Robotersysteme sowie über bereits erprobte Anwendungslösungen zum Einsatz der Mikroelektronik:
  - Informationen zum Bauelemente-Sortiment, zu technischen Daten und zu bauelementebezogenen Appikationshinweisen
  - Informationen über Lieferbedingungen und -möglichkeiten zu Bauelementen
  - Informationen zum internationalen Entwicklungstrend in Form von „Informationen für leitende Kader"
- Aktive Mitwirkung an der Weiterbildung von Erstanwendern der Mikroelektronik in enger Zusammenarbeit mit den Hoch- und Fachschulen und den KDT-Bildungsmaßnahmen:
  - Weiterbildung von Technologen, insbesondere auf dem Gebiet der Fertigungsvorbereitung
  - Weiterbildung von Rationalisierungsmittel-Entwicklern
  - Weiterbildung von Leitungskadern der unteren und mittleren Ebene
  - Ausbildung von Mikroelektronik-Anwendern an konkreten Objekten/Exponaten
- Organisierung und konkrete Teilnahme an der Durchführung von Entwicklungsaufgaben auf vertraglicher Basis entsprechend den praktischen territorialen Möglichkeiten; Vermittlung der Anwender an Applikationslabors oder andere F/E-Stellen; dazu zählen Entwicklungsaufgaben zur
  - Erarbeitung von Studien und Lösungskonzepten
  - Programmierung durch Mikrorechner
  - Erarbeitung von Software-Lösungen
  - Entwicklung von Baugruppen
  - Entwicklung von Steuerungen
- Mitarbeit am Aufbau des Nachnutzungsspeichers (ZNAM) für erprobte Lösungen der Mikroelektronik im VEB AEB durch
  - Erfassung und Speicherung von Informationen der Anwender mikroelektronischer Bauelemente über geplante und realisierte Einsatzmöglichkeiten
  - Publizierung multivalent zu verwendender modifizierbarer und ergänzungsfähiger Realisierungsbeispiele der Mikroelektronik
  - Vermeidung von Doppelentwicklungen und somit rationellerer Einsatz der Entwicklungskapazitäten
  - Organisierung der systematischen Sammlung von Software-Dokumentations-Nachweisen zwecks Speicherung und Organisierung einer gezielten Nachnutzung.

Zusammenfassende Schlußbemerkungen

Im Weltmaßstab ist festzustellen, daß sich das Tempo des wissenschaftlich-technischen Fortschritts, die Breite der Anwendung der Mikroelektronik als ein bestimmender Faktor dieses Fortschritts und sein Einfluß auf die Effektivität der Volkswirtschaften mit dem Eintritt in die 80er Jahre ganz erheblich beschleunigen. Festzustellen ist, daß neue wissenschaftliche Erkenntnisse zu neuen Wirkungsprinzipien und neuen Technologien führen, die in großer Breite zur Anwendung gelangen. Heute gibt es kaum noch ein Gebiet, auf dem die Mikroelektronik noch nicht Einzug gehalten hat. Das trägt im Kapitalismus mit zur Verschärfung der Widersprüche bei. Im Sozialismus wird der wissenschaftlich-technische Fortschritt planmäßig und gezielt zur Sicherung und Lösung der Hauptaufgabe im Interesse der Werktätigen angewendet.

Die schnelle und breite Anwendung der Mikroelektronik bietet dafür als Schlüsselindustrie unserer Volkswirtschaft vielfältige, noch längst nicht umfassend erkannte und genutzte Möglichkeiten.

Jeder Leiter muß diese Orientierung beachten, die Anwendung der Mikroelektronik als ein wichtiges Mittel zur Steigerung der Effektivität in seinem Verantwortungsbereich erkennen, organisieren und durchsetzen. Dabei muß davon ausgegangen werden, daß die Mikroelektronik klare und eindeutige technologische Verhältnisse, exakte Übersichten und fundierte Prozeßablaufpläne, logische Zusammenhänge, die algorithmierbar und programmierbar sind, erfordert. Die Einführung der Mikroelektronik stellt aber auch bereits im Anfangsstadium hohe Anforderungen an die gezielte Qualifizierung und Weiterbildung aller Mitarbeiter und Leiter.

Der von allen Betrieben und Einrichtungen zu erbringende Leistungsanstieg in den 80er Jahren erfordert zwingend, alle Möglichkeiten der Mikroelektronik effektiv zu nutzen. Der VEB Applikationszentrum Elektronik Berlin im VEB Kombinat Mikroelektronik und die Beratungs- und Informationsstellen Mikroelektronik in den Bezirken der DDR werden dabei jede mögliche Hilfe und Unterstützung geben. msr 7578

Programmierbare nichtnumerische Steuerungen (XVII)[1)]

Dr.-Ing. *G. Roland*, Karl-Marx-Stadt

Programmierbares Steuerungs- und Baugruppensystem PS 2000

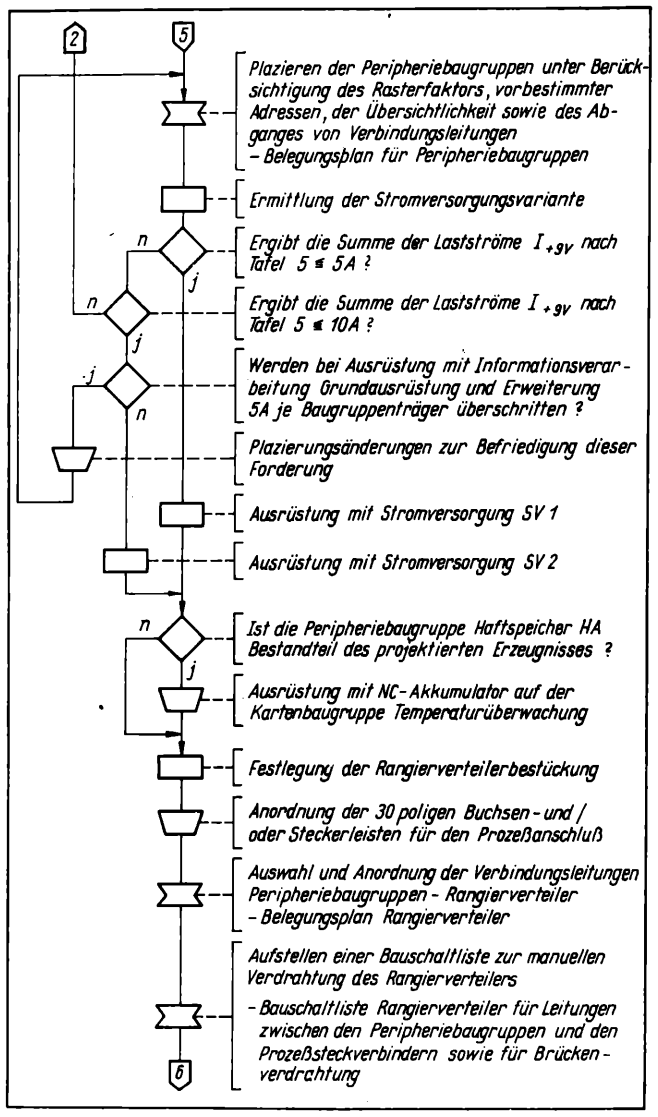


Bild 55. Projektierung, Teil 4

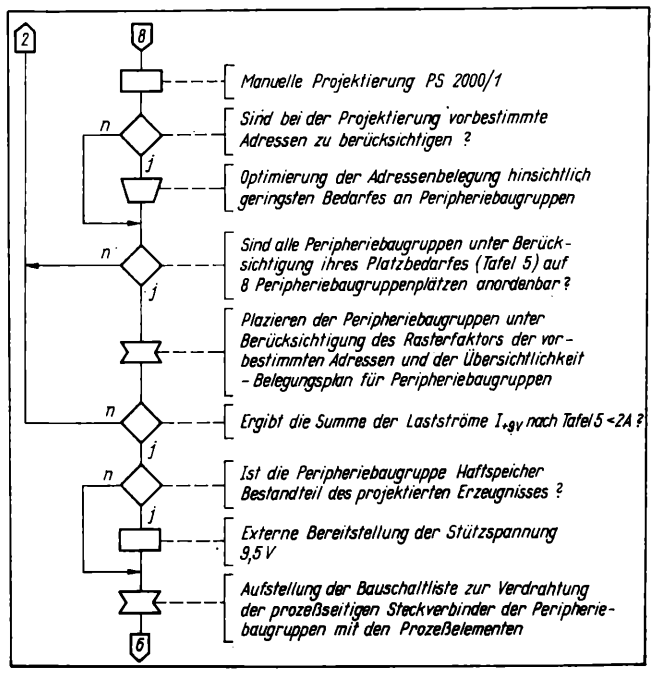


Bild 56. Projektierung, Teil 5

— Programmspeicherkapazität C_n

Zur Abschätzung der Programmspeicherkapazität dient folgende Ungleichung:

$$C_n < 1{,}2 \cdot V(\Sigma F + \Sigma F_K \cdot F_{FK})$$

Bedeutung der Faktoren:

1,2 20% Reserve bei Neuprojektierungen

V Durchschnittliche Anzahl von Ein- und Ausgängen der logischen Funktionen F

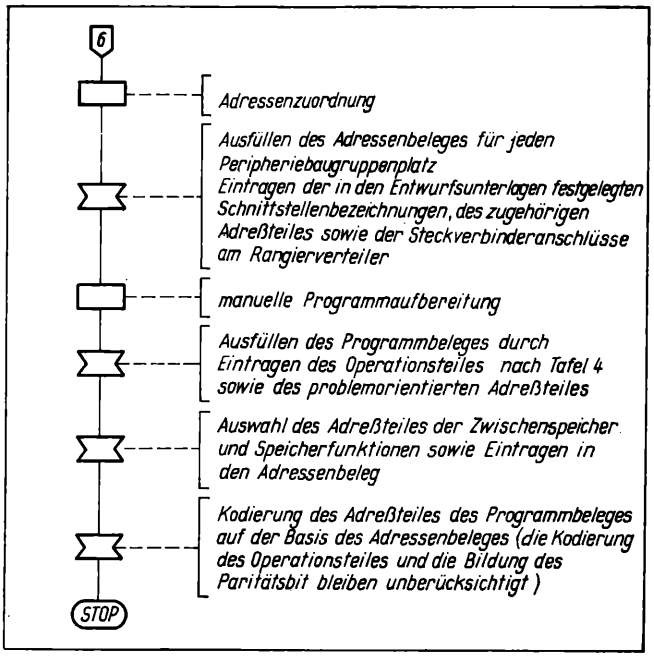
F Logische Funktionen, z. B. Elementarfunktionen, nach Abschn. 2.2.1., Zwischenspeicher nach Abschn. 2.2.2., Sonderbaugruppen nach Abschn. 2.2.4. und andere Funktionen, die mit einer Ladeoperation beginnen und mit einer Transportoperation TA oder TEC enden.

F_K Komplexe logische Funktionen, z. B. programmtechnisch realisierte Zähler, Schieberegister, Vergleicher, Dekoder und andere Funktionen, die aus mehreren logischen Funktionen F bestehen.

F_{FK} Durchschnittliche Anzahl der logischen Funktionen F innerhalb der komplexen logischen Funktion F_K.

Eine wesentliche Entscheidung für den weiteren Projektierungsablauf wird durch die Festlegung der problemabhängigen oder problemunabhängigen Lieferform getroffen (PS 2000/1 ist nur problemunabhängig lieferbar). Für die problemabhängige Lieferform muß der Steuerungsanwender auf der Grundlage der

Bild 57. Projektierung, Teil 6



[1)] Teil XVI erschien im Heft 5/1982.

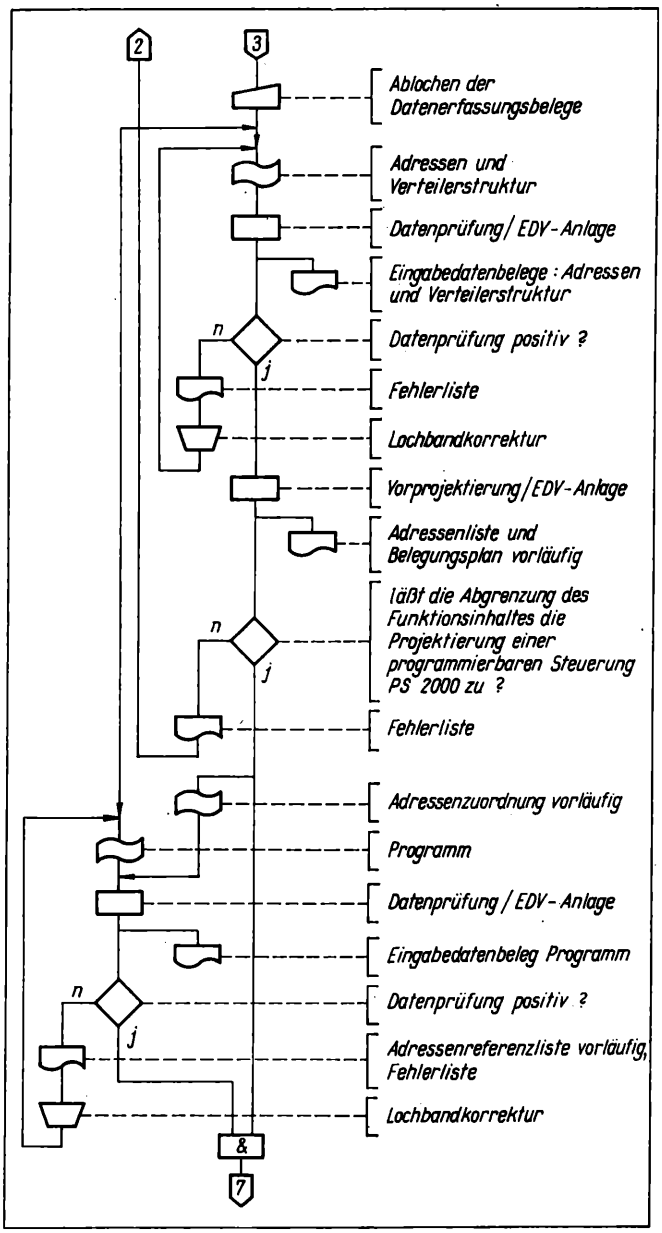


Bild 58. Projektierung, Teil 7

Erfassungsvorschrift PS 2000 die Datenerfassungsbelege erarbeiten und dem Hersteller zusammen mit seiner Bestellung übergeben. Alle weiteren Projektierungsarbeiten führt der Steuerungshersteller maschinell aus.

Die problemunabhängige Lieferform ist dadurch gekennzeichnet, daß der Steuerungshersteller nach Angaben des Anwenders alle Hardwarebaugruppen einschließlich des unprogrammierten Programmspeichers bereitstellt. Die Aufgabe des Anwenders besteht in der Projektierung dieser Baugruppen zu einer problemabhängigen Steuerung. Dazu kann er sich der maschinellen Methode bedienen, falls er durch Nachnutzung über das EDV-Projekt „Maschinelle Aufbereitung PS 2000" und eine entsprechende Anlagenkonfiguration einer EDV-Anlage R 21 verfügt. Andernfalls muß eine manuelle Projektierung durchgeführt werden. Die programmierbare Steuerung PS 2000/1 muß grundsätzlich manuell projektiert werden. Dabei bedarf die Kodierung des Programmbeleges besonderer Sorgfalt, da alle Fehler nur im Rahmen der funktionellen Testung auffindbar sind. Nachdem alle Belege erarbeitet wurden und die problemunabhängige Ausrüstung zur Verfügung steht, sind der Rangierverteiler zu verdrahten und alle Peripheriebaugruppen anzuordnen. Die Programmierung der EPROM's erfolgt im Rahmen der Programminbetriebnahme.

Dazu enthält der nachfolgende Abschnitt Ausführungen. Der Ablauf der maschinellen Programmierung ist ebenfalls als Programmablaufplan dargestellt (Bilder 52, 53, 58, 59).

Breiten Raum nimmt dabei die Datenprüfung ein. Die Prüfung der Adressen und Verteilerstruktur bezieht sich auf alle Festlegungen der Erfassungsvorschrift, insbesondere auf die zulässigen Adressen- und Verteilerbereiche sowie das Format der Daten. Zusammen mit den Eingabedatenbelegen schafft die Fehlerliste Voraussetzungen, um in Absprache mit dem Anwender die manuelle Lochbandkorrektur auszuführen. Da in der Regel die Adressen- und Verteilerstrukturbelege wesentlich früher als der Programmbeleg vom Anwender bereitgestellt werden können, aber die Festlegung der Zwischenspeicher nicht enthalten ist, wird nach erfolgreicher Datenprüfung eine Vorprojektierung durchgeführt. Nach Überprüfung der Abgrenzung des Funktionsinhaltes werden alle Peripheriebaugruppen plaziert und adressiert. Die vorläufigen Druckbelege dienen insbesondere der Materialdisposition.

Die Datenprüfung der Programmbelege basiert ebenfalls auf den Festlegungen der Erfassungsvorschrift, z. B. Zulässigkeit des Operationsteiles, Wortlänge, Identität zwischen dem problemorientierten Adreßteil (Name) des Adressen- und des Programmbeleges. Entsprechend einer Vereinbarung in der Erfassungsvorschrift sind alle Adreßteile, die im Programmbeleg Verwendung finden und im Adressenbeleg nicht erklärt sind, als Zwischenspeicher festzulegen.

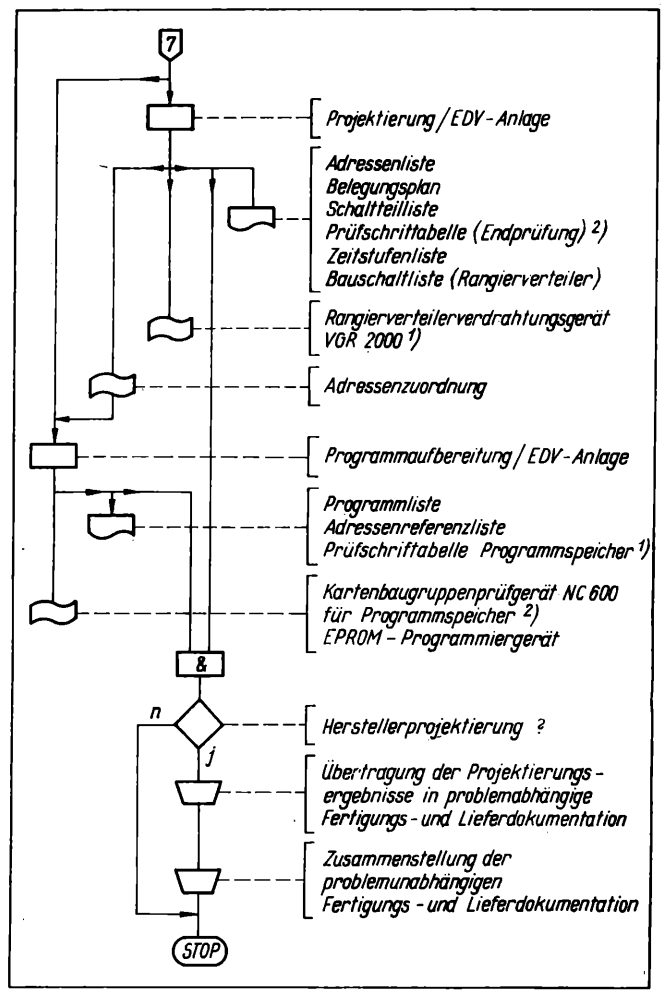
An die erfolgreiche Datenprüfung schließt sich die endgültige Projektierung an.

msr 7177 (wird fortgesetzt)

Bild 59. Projektierung, Teil 8

[1]) Dokumentation und Datenträger werden bei Anwenderprojektierungen bei Bedarf hergestellt

[2]) Datenträger wird nur bei Herstellerprojektierung erarbeitet



Zum Aufbewahren von Reparaturmaterial in elektrotechnischen Betriebsräumen

IA 4.1.5.; 6.4.

TGL 200-0619/02 [1] verbietet in elektrotechnischen und BMSR-technischen Anlagen das Lagern oder Aufbewahren von Gegenständen, die nicht unmittelbar zur Aufrechterhaltung des Betriebsablaufes erforderlich sind, die Entstehung sowie Ausbreitung von Bränden begünstigen und die Durchführung der Brandbekämpfung durch Einengung der Angriffswege behindern. Das Verbot gilt eindeutig für elektrotechnische Anlagen, nicht aber für Betriebsräume. Überdenkt man aber den beabsichtigten Zweck, so erwachen Zweifel.

TGL 200-0602/01 [2] definiert die „elektrotechnische Anlage" als Gesamtheit der zu einer technischen Einheit gehörenden elektrotechnischen Betriebsmittel, die eine bestimmte Funktion erfüllen. Ein „elektrotechnischer Betriebsraum", so heißt es an gleicher Stelle, ist ein betretbarer Raum, der vorzugsweise zum Betreiben elektrotechnischer Anlagen dient und im allgemeinen nur unterwiesenen Mitarbeitern zugänglich ist. Demnach bezieht sich das soeben zitierte Verbot für die Lagerung oder Aufbewahrung auf das im Betriebsraum enthaltene Volumen der elektrotechnischen Anlage. Die konstruktive Umhüllung der elektrotechnischen Betriebsmittel, z. B. Zellen- oder Schrankwand, Schutzgitter oder Abwehrleiste, grenzt das Volumen der elektrotechnischen Anlage vom elektrotechnischen Betriebsraum ab.

Aus brandschutztechnischer Sicht kann man mit dieser Interpretation nicht zufrieden sein. Richtige Entscheidungen zu diesem Problem sind offensichtlich nur bei sinnvoller Anwendung der Vorschrift möglich. Es ist vielfach üblich, Materialien als Störreserve in dementsprechend begrenztem Umfang in elektro- und BMSR-technischen Betriebsräumen aufzubewahren.

Im Ergebnis der Diskussion mit Fachkollegen staatlicher und betrieblicher Aufsichtsorgane, die auch in den KDT-Fachgremien mitarbeiten, gibt es dagegen auch keine grundsätzlichen Einwände. Im Interesse des Brandschutzes sollten jedoch folgende Bedingungen erfüllt sein:

- keine Erhöhung des anlagebedingten Brandgefährdungsgrades gemäß TGL 30042 [3]
- keine bemerkenswerte Erhöhung der Brandlast gemäß TGL 10685/01 [4] für den betreffenden Betriebsraum
- keine Behinderung für das ordnungsgemäße Betreiben der elektrotechnischen BMSR-Anlage und für die Brandbekämpfung
- kein Verstoß gegen Festlegungen des Brandschutzes in speziellen Standards für das Betreiben der jeweiligen Anlage
- kein Verstoß gegen spezielle brandschutztechnische Festlegungen des Herstellers der elektrotechnischen Betriebsmittel bzw. Anlagen, die sich im betreffenden Betriebsraum befinden.

Unter diesen Bedingungen können sich auch Leerzellen in Wartenräumen, Relaisschränke ohne elektrotechnische Einbauten und andere Leervolumen für das Aufbewahren von Reservematerialien eignen. Daß es sich in jedem Fall nur um unbedingt notwendige Materialien für die jeweilige Anlage handeln kann, bedarf keiner Frage.

Neben den brandschutztechnischen Aspekten dürfen die betrieblichen Belange nicht außer acht bleiben. Notreserven für das Beheben von Brandschäden verlieren in unmittelbarer Nähe des potentiellen Brandortes ihren eigentlichen Sinn.

Literatur

[1] TGL 200-0619/02: Betreiben elektrotechnischer Anlagen; vorbeugender Brandschutz und Brandbekämpfung. Ausg. Dezember 1970.
[2] TGL 200-0601/02: Elektrotechnische Anlagen; allgemeine Errichtungsvorschriften, Begriffe. Ausg. August 1979.
[3] TGL 30042 Gesundheits- und Arbeitsschutz, Brandschutz; Verhütung von Bränden und Explosionen, allgemeine Festlegungen für Arbeitsstätten. Ausg. Juni 1977.
[4] TGL 10685/01 Bautechnischer Brandschutz; Begriffe. Ausg. Dezember 1963, mit Vorschrift 9/74 der StBA (in Überarbeitung).

msr 7556 Obering *J. Pester*, FUA 1.11 der KDT (Elektrotechnische Anlagen in explosionsgefährdeten Arbeitsstätten)

Zu einigen Begriffen auf dem Gebiet der Entwicklung und Projektierung von Automatisierungssystemen

Die Begriffe „Projektierung", „Entwicklung" und „Entwurf" werden in der Automatisierungstechnik und auch in angrenzenden Gebieten, wie der Rechentechnik oder der Mikroelektronik, in überlappender Bedeutung verwendet. Das gibt oft Anlaß zu Mißverständnissen.

Aus diesem Grunde hat sich der Fachausschuß Steuerungstheorie der WGMA gemeinsam mit dem Fachausschuß Projektierung von Automatisierungsanlagen bemüht, diese und weitere damit im Zusammenhang stehende Begriffe zu spezifizieren. Die Aussagen beziehen sich in erster Linie auf Automatisierungssysteme, die gemäß TGL 14591 Baugruppen, Funktionseinheiten (z. B. Schaltkreise), Geräte, Einrichtungen oder Anlagen sein können. Es kann sich dabei um Regelungen, Binärsteuerungen oder hybride Systeme handeln, die zur Prozeßüberwachung und -sicherung, zur Prozeßstabilisierung und -optimierung verwendet werden. Da die Aussagen bis zu einem gewissen Grade auch auf die angrenzenden Fachgebiete zutreffen, wird hier allgemein vom Begriff „System" ausgegangen.

Aufgabe der beiden KDT-Gremien konnte es natürlich nicht sein, allseitig abgestimmte und abgesicherte Begriffsdefinitionen zu erarbeiten. Die nachfolgenden Ausführungen sollen Empfehlungen sein, die sich vor allem an einigen wesentlichen Merkmalen orientieren und eine Diskussionsgrundlage für die weitere Präzisierung bilden.

Sowohl unter Entwicklung als auch unter Projektierung eines Systems versteht man i. allg. die Gesamtheit der ingenieurtechnischen Leistungen zur Erarbeitung der Unterlagen (Dokumentation) für die Herstellung und den Betrieb dieses Systems.

Entwicklung

Typisch für die Entwicklung ist ein Vorgehen bei der Erarbeitung der Unterlagen für die Herstellung und den Betrieb von Systemen, bei dem auch experimentelle Untersuchungen und Mustererprobungen möglich sind und durchgeführt werden.

Ein derartiges Vorgehen, d. h. eine Entwicklung, wird dann praktiziert, wenn bezüglich Art und Umfang des Systems zu wenig Erfahrungen vorliegen und aus ökonomischen Gründen Experimente und Mustererprobungen gerechtfertigt sind. Der Begriff Entwicklung ist daher vorwiegend an Baugruppen, Funktionseinheiten, Geräte und ggf. Teilanlagen gebunden.

Projektierung

Typisch für die Projektierung ist ein Vorgehen bei der Erarbeitung der Unterlagen für die Herstellung und den Betrieb von Systemen, bei dem gegebene Elemente (Geräte, Funktionseinheiten, Programmodule) verknüpft werden, ohne daß nennenswert experimentelle Untersuchungen durchgeführt werden.

Die Motivierung für dieses Vorgehen ist darin zu sehen, daß üblicherweise die jeweils projektierte Anlage produktionswirksam werden muß. Entweder können aus ökonomischen oder anderen Gründen keine gesonderten Muster angefertigt werden, oder aufgrund inzwischen vorliegender Erfahrungen sind keine experimentellen Untersuchungen notwendig. Die Erarbeitung der Unterlagen erfolgt bei der Projektierung weitgehend auf der Grundlage von Katalogmaterial und angesammelten Erfahrungen. Der Begriff Projektierung ist daher in erster Linie gebunden an Anlagen und komplexe Systeme.

An einigen Beispielen soll die Verwendung der Begriffe Entwicklung und Projektierung demonstriert werden. Man spricht üblicherweise von

- der Entwicklung eines Bausteins, einer Kartenbaugruppe, eines Reglers, eines Gerätes, eines integrierten Schaltkreises, einer freiprogrammierbaren Steuereinrichtung, eines Rechners
- der Projektierung der Steuerung eines konkreten Prozesses auf der Basis einer vorhandenen freiprogrammierbaren Steuereinrichtung, der Projektierung einer Automatisierungsanlage für einen konkreten Anwendungsfall, der Projektierung eines Rechenzentrums.

Damit passen sich die hier vorgeschlagenen Definitionen der Begriffe „Entwicklung" und „Projektierung" auch weitgehend dem bisher in der Umgangssprache üblichen Gebrauch an.

Sowohl der Begriff Entwicklung als auch der Begriff Projektierung umfaßt:

- Klärung und Spezifizierung der Aufgabenstellung (Steuerungsziele)
- Gestaltung der Strukturen
- Erarbeitung der Ausführungsunterlagen (für Herstellung und Inbetriebnahme)
- Erarbeitung der Unterlagen für Betrieb und Wartung.

In beiden Fällen spielen je nach Art des zu entwickelnden bzw. zu projektierenden Systems die folgenden Aufgabenkomplexe eine besondere Rolle: Entwurf, Konfigurierung, Instrumentierung, Implementierung, Dimensionierung, Konstruktion.

Entwurf

Unter Entwurf werden vorwiegend die Vorbereitungsstufen zur Erarbeitung von Lösungen der Entwicklung oder Projektierung verstanden.

Beim Entwurf handelt es sich also um die „abstrakten" Arbeiten innerhalb von Entwicklung und Projektierung. Bei Binärsteuerungen spricht man vom Logikentwurf und meint damit die Analyse der Problemstellung, die Problembeschreibung in einer formalen Sprache, die Erarbeitung einer Struktur (z. B. Logikplan) und die Analyse des Verhaltens dieser Struktur. Bei Regelungssystemen versteht man unter Entwurf die Analyse der Regelungsaufgabe, die Spezifizierung der Zielfunktionen, die Festlegung der Regelkreisstruktur und die Bestimmung des Reglers bezüglich Statik und Dynamik. In der Entwurfsetappe muß in beiden Fällen noch nicht festliegen, welche Baugruppen usw. konkret für die Realisierung eingesetzt werden sollen. Hinsichtlich der Detaillierung der Analyse der Regelungsaufgabe oder der Problemstellung für ein Schaltsystem gibt es typische Unterschiede zwischen Projektierung und Entwicklung. Bei der Projektierung muß man mit unvollständigen und ungenauen, d. h. qualitativen Prozeßmodellen auskommen. Bei der Betrachtung von Parametern interessiert dabei nur, ob es Einstellbereiche gibt, in denen Werte existieren, die die gewünschten Eigenschaften garantieren. Die tatsächlichen Einstellwerte werden erst bei der Inbetriebnahme auf der Basis besserer Prozeßkenntnis bestimmt.

Instrumentierung

Instrumentierung ist die Festlegung des auf der Basis der erarbeiteten Struktur einzusetzenden Gerätesystems und der handelsüblichen Baugruppen, Funktionseinheiten, Geräte usw.

Implementierung

Implementierung ist die Realisierung von (Steuerungs-) Algorithmen durch Programme

Dimensionierung

Dimensionierung ist die Festlegung von funktionellen Parametern bei Hardware-Realisierungen

Parametrierung

Parametrierung ist die Festlegung von funktionellen Parametern in gegebenen Programmodulen

(Fortsetzung auf Seite 343)

10. Jahrestagung „Grundlagen der Modellierung und Simulationstechnik" vom 8. bis 10. Dezember 1981 in Rostock

Die verantwortliche Durchsetzung hoher politischer Zielstellungen in dem Gebiet Wissenschaft—Technik ist an theoretische Vorarbeiten und praktische Erkenntnisse gebunden, die erst dann in voller Breite zum aktuellen Wissensstand werden können, wenn sie in entsprechender Weise den Fachkollegen vorgestellt und zur Diskussion angeboten werden. Ein derartiges Angebot wird regelmäßig mit den Jahrestagungen des Fachausschusses „Modellierung" der WGMA in der KDT in Rostock unterbreitet und — die Teilnehmerzahl unterstreicht es — reichlich genutzt. Die feierliche Eröffnung der Tagung trug dem Jubiläumscharakter Rechnung; im Festsaal des Rathauses begrüßte der Rektor der Wilhelm-Pieck-Universität, Prof. Dr. sc. paed. *W. Brauer*, die Gäste und betonte dabei die Notwendigkeit des engen Kontaktes zwischen Wissenschaft und Praxis. Die guten partnerschaftlichen Beziehungen ČSSR—DDR hob der Vertreter der Ingenieurorganisation der ČSSR, Dipl.-Ing. *K. Kabeš*, hervor. In der Festansprache betonte der Vorsitzende des Fachausschusses, Prof. Dr. rer. nat. *A. Sydow*, das erfolgreiche Wirken des FA über die 15 Jahre seines Bestehens anhand ausgewählter Beispiele (wie Arbeit der Konsultationsstützpunkte, Ergebnisse der Unterausschüsse, Erarbeitung von Expertisen, Praxisberatung und nicht zuletzt die Öffentlichkeitsarbeit).

Neben etwa 70 Einzelbeiträgen in 6 Sektionen wurden 5 Plenarvorträge gehalten. *K. Bichtler*, Berlin, hob moderne Aspekte und Probleme der Systemanalyse hervor, die bei der zunehmenden Komplexität der Probleme eine immer größere Bedeutung gewinnt, und zeigte international behandelte Aufgaben auf, die sich an praktischen Forderungen orientieren und stets den Mut zur interdisziplinären Zusammenarbeit verlangen. *W. W. Kalaschnikow*, Moskau, behandelte komplexe Systeme und Methoden ihrer Analyse und ging dabei auf methodologische Probleme der Simulation ein, verwies auf volkswirtschaftliche und technische Objekte und moderne mathematische Methoden zu ihrer Behandlung. Zu einigen Grundproblemen des Umweltschutzes und systemtheoretischen Aspekten bezog *E. Seidel*, Berlin, Stellung und verdeutlichte ihre enge Verflechtung zur Volkswirtschaft (die Erhöhung ihrer Effektivität ist eng mit abprodukt-, energie- und wasserarmen Technologien verbunden, die eine erhöhte Verfügbarkeit der Naturressourcen langzeitlich bedeuten und ebenso die Verbesserung der Arbeits- und Lebensbedingungen). Einen Überblick zu „Stand und Trends der Rechentechnik" vermittelte *A. Jugel*, Dresden, gegliedert nach Hardware (Stichpunkte: Schaltkreise, Technologien, Peripherie) und Software (Systemtheorie/Architektur, Sprachentwicklung, Softwaretechnologie). Daraus seien hier die Schwierigkeiten in der Entwurfs- und Prüftechnologie herausgestellt, die sich aus dem hohen Konzentrationsgrad der Schaltkreise und ihren Geschwindigkeiten ergeben, so daß die Simulation aller Baugruppen mit der großen Anzahl an Eingangssignalen (10^6) zu nicht mehr vertretbaren Simulationszeiten führen würde. Unter den Programmiersprachen ist wachsendes Interesse an COBOL zu bemerken; bei der Dialogsoftware führt der Trend zu neuen Menüsprachen, die vom Anwender selbst hergestellt werden können. „Zur Phänomenologie von Evolutionsprozessen" trug *G. Mende*, Berlin, vor, er folgte dabei den Phasen Preparation, Expansion, Transition, Maturation, Saturation und Climax. Breiten Raum nahm die Darstellung der Entwicklungsphase ein, die u. a. durch Beispiele für das hyperbolische Wachstum (Entwicklung der Sonne, des O_2-Spiegels in der Atmosphäre, Erdbevölkerung) und für ratengekoppelte Systeme (Individualentwicklung) und zugehörige mathematische Beschreibungsmöglichkeit verdeutlicht wurde.

Die Sektion 1 (Vors.: *H. Adler*, Dresden; *K. Kabeš*, Prag) war der Simulation kontinuierlicher Modelle (konzentrierte und verteilte Parameter) und der Simulationstechnik vorbehalten. *R. Apalovičová*, Bratislava/ČSSR, untersuchte eine Halbleiterstruktur zunächst hybrid (System ADT 7000), dann mit Digitalsimulation (Sprache HSS). Gesucht war bei diesem typischen Applikationsfall die Verteilung des elektrischen Feldes unter dem Gatter eines MOS-Transistors für verschiedene Bedingungen. Einen Modellfonds für verfahrenstechnische Grundprozesse und seine Handhabung zur Lösung von Wärme-, Stofftrenn- und Stoffumwandlungsprozessen stellte *M. Wagner*, Leipzig, vor. Für DIGSIM-ES wurden Komplexblöcke zur Berechnung des dynamischen (Sonderfall: statischen) Verhaltens entwickelt. Ein weiterer Beitrag zur Entwicklung verfahrenstechnischer Systeme mit rechnergestützter Modellierung von *W. Krug*, Köthen, folgte mit besonderer Betonung des Problems der Modellfindung (Vorteile der Dialogmöglichkeiten; Sprachen DISIP 1 und DISIP 2). Das bereits verschiedentlich genutzte Dialogsystem IUS für ESER stellte *S. Seidel*, Dresden, vor unter besonderer Beachtung der auf Universalität gerichteten Möglichkeiten (etwa mehrere Betriebssysteme, verschiedene Sprachen); es ist effektiver als TSO. Der Translator HYFOR (*H. Scheffel*, Ilmenau) gestattet eine problembezogene Beschreibung für ingenieurtechnische Berechnungen an digitalrechnergesteuerten dynamischen Systemen; Implementierung mit DEPOT, z. Z. für ESER nutzbar, für K 1600 in Vorbereitung. Die besondere Problematik der Elektroenergieversorgung auf Schiffen wurde von *H. Mrugowsky*, Wismar, behandelt (Digitale Simulation des Betriebsverhaltens elektrischer Maschinen im Inselbetrieb). Das zugehörige Programmsystem EDISIM kann ein Drehstrom-Bordnetz (Landanschluß, maximal 3 elektrische Maschinen) und ein mechanisches Mehrmassensystem (mehrere Dieselmotoren und andere Drehmassen) verarbeiten; das Modell enthält maximal 60 DGLn und 30 algebraische Gleichungen. Für das FORTRAN-Programmsystem mit 40 UP wird ein Speicherbedarf von 130 kbytes angegeben. Vom Anwender auszuwerten sind Zeitverläufe, die als Tabelle oder Diagramm erhalten werden. Erste Einsatzerfahrungen mit einem digitalen Differentialanalysator DDA beschrieb *K. Dobiás*, Prag; er analysierte die gewonnenen Ergebnisse und erläuterte die weitere Entwicklung auf diesem Gebiet. Ziel des Vortrages Mehrprozessorsysteme und die Modellierung ihres Verhaltens (*Ro. Schönefeld*, Ilmenau) war es, einen Beitrag zu einer Entwurfsmethodik von Mehrprozessorsystemen zu skizzieren; Bewertungskriterien und Applikationsbeispiele wurden gezeigt. Ebenfalls zur Problematik Mehrprozessorsysteme gehörte der Beitrag von *G. Schorr*, Ilmenau, in dem die Lösung linearer Gleichungssysteme analysiert wurde. Der Entwurf digitaler Systeme erfolgt in mehreren Etappen oder Ebenen, Unterstützung durch Simulation kann hierbei mit der Entwurfssprache SDL gegeben werden. *M. Roesner*, Dresden, erläuterte das Programmsystem (nachnutzbar für EC 1040/55), das bei der Entwicklung K 1620 und K 1630 angewandt worden ist (z. B. zur Darstellung und Simulation des digitalen Entwurfes auf der Registernetz- und Mikroprogrammebene, in der auch umfangreiche Boolesche Gleichungen fixierbar sind). Die Hybridrechenanlage HRA 7201 wird zur Steuerung biotechnologischer Prozesse (*B. Reimann*, Jena) in On-line-Kopplung mit hochinstrumentierten Fermentoren genutzt. Analyse relevanter Meßdaten, Zeitüberwachung und Statusprüfungen gestatten Zustandsvorhersagen und -vergleiche und ggf. Alarm- und Havariemeldungen. Das mathematische Modell der Herzkammer wurde von *U. Bendel*, Berlin, auf der Grundlage des Modells eines gekrümmten Muskels (gekoppelte DGln, die die Dynamik der Wand- und Strömungsverhältnisse beschreiben) behandelt. Die neuen Hybridrechnerentwicklungen aus der ČSSR wurden von *K.*

(Fortsetzung von Seite 342)

Konstruktion

Konstruktion ist die Festlegung geometrischer Abmessungen und ggf. die Wahl der Werkstoffe.

msr 7625 *H. J. Zander* (FA Steuerungstheorie), *R. Müller* (FA Projektierung von Automatisierungsanlagen)

Kabeš, Prag, vorgetragen. Das System HVS 4500 besteht aus einem digitalen Minirechner ADT 4500 und einem Analogprozessor MEDA 4500. Eigenschaften, Kapazitäten und Leistungsparameter wurden diskutiert.

Die sorgfältig vorbereiteten Vorträge dieser Sektion ließen auch bei stark unterschiedlichen Anwendungsgebieten das Typische deutlich werden, so daß immer rege diskutiert werden konnte. Die weitere Verbreitung des Einsatzes von Dialogmöglichkeiten wurde oft als notwendig apostrophiert.

Von kombinierten Modellen und kombinierten Simulationssystemen handelte Sektion 2 (Vors.: *G. Schwarze*, Berlin). Entwicklung und Vorstellung von Simulationssystemen als Basissoftware (*E. Kindler*, Prag) prägen nicht mehr die Szene. BOSCOS steht für blockorientierte Simulation von kombinierten Systemen und ist eine Unterklasse der Standardklasse SIMULATION der modernen Programmiersprache SIMULA 67. Zunehmend gewinnen die Methoden zur Simulation an Bedeutung; so trug *H.-D. Gerhardt*, Berlin, über Kombi-Netze und mathematische Modellbildung vor. Im wesentlichen besteht ein Kombi-Netz aus einem graphischen Teil zur strukturellen Beschreibung eines Originalsystems und einem das Verhalten der Elemente beschreibenden Teil. *G. Balogh*, Budapest, stellte Koppelsoftware zur Experimentunterstützung bei Berücksichtigung stochastischer Einflüsse im Modell (Entscheidungsoptimierungsalgorithmus für kombinierte Simulationssprachen) vor; die Methode benutzt den Hooke-Jeeves-Algorithmus zur Optimumsuche. Auf Anwendungen der Simulationssoftware wiesen die Beiträge von *M. Kuhpfahl*, Leuna-Merseburg, und *P. Böhme*, Leuna-Merseburg, hin, beide aus dem Gebiet der chemischen Verfahrenstechnik.

Im zusammenfassenden Beitrag von *G. Schwarze*, Berlin, wurde auf die Notwendigkeit eingegangen, neue Anwendungsgebiete zu erschließen, anwendungsorientiert weiter zu entwickeln und erprobte Koppelsoftware bereit zu stellen, die das Experimentieren und Auswerten der Simulationsdaten erleichtert. Abschließend wurde darauf hingewiesen, die Forschung in allen RGW-Staaten zu intensivieren, ausgehend von der gemeinsamen Basis für kombinierte Modelle miteinander die Weiterentwicklung von Simulationssoftware zu betreiben. Für die kommende Tagung sind besonders Beiträge zur Softwarenachnutzung und praktischen Anwendung erbeten.

Die Sektion 3 (Vors.: *M. Frank*, Dresden; *P. Lorenz*, Magdeburg) war der Simulation diskreter Modelle gewidmet. In den Beiträgen von *W. Weller*, Berlin, und *W. Sauer*, Dresden, zu allgemeineren Problemen der Modellierung diskreter Prozesse wurden Möglichkeiten der Bildung und Nutzung analytischer Modelle dargestellt, die Denkanstöße auch zur Gestaltung algorithmischer Modelle gaben, wie sie gewöhnlich bei der Simulation diskreter Prozesse genutzt werden. Das gilt insbesondere für den Aspekt der Lernfähigkeit, d. h. die Einbeziehung von Lernprozeduren in solche Modelle. Eine wichtige Entwicklungstendenz der mathematischen Behandlung praktischer Probleme der Gestaltung von Fertigungs- und Fertigungssteuerungsprozessen machte *W. Stanke*, Karl-Marx-Stadt, sichtbar. Es wurde das praktisch erprobte Modellsystem MAOSIM vorgestellt, das aus mehreren aufeinander abgestimmten Projektteilen besteht, in denen die Lösung des jeweiligen Teilproblems mit einem speziell darauf zugeschnittenen mathematischen Verfahren vorgenommen wird. Die darin zum Ausdruck kommende Tendenz besteht in der problemabhängigen Kopplung unterschiedlicher Modelle und Lösungsverfahren sowohl analytischer als auch simulativer Art im Sinne der mit dem Begriff „Modell- und Algorithmenbank" verbundenen perspektivischen Entwicklungslinie. Die große volkswirtschaftliche Bedeutung von Simulationsexperimenten kam in den folgenden Vorträgen zum Ausdruck, beispielsweise bei der Projektierung von Teilefertigungsprozessen (*D. Moron*, Karl-Marx-Stadt) oder von Montagesystemen (*V. Cibulka*, Novo Mesto/ČSSR). An praktischen Problemstellungen wurde nachgewiesen, daß bei rationeller Modellimplementation auch operative Steuerungsprobleme z. B. in Montageprozessen (*H. Stahn*, Dresden) als auch bei metallurgischen Prozessen (*M. Brandt*, Brandenburg) simulativ gelöst bzw. durch Strategie-Empfehlung unterstützt werden können. Dabei (*H. Stahn*) ergaben sich auch neue Ansätze zur Nutzung des Simulationssystems SIMDIS (für ESER verfügbar). Die Simulation diskreter, bautechnologischer Prozesse im Bauwesen nahm *G. Hohmann*, Weimar, vor. Dazu wurde eine spezielle Fachsprache vom Typ ICES/SAPRO benutzt, in der 10 Sprachkommandos zur Verfügung stehen. Aus der Zustandsanalyse des stochastischen Erneuerungsprozesses ermittelte *M. Geißler*, Mittweida, Zuverlässigkeitskenngrößen komplexer Strukturen (etwa: Parameterschätzungen für MTBF, Verfügbarkeit, statistische Häufigkeit der Zustände und Ausfall- bzw. Reparaturdauer). Auf die verwendete Rechentechnik eingehend, kann die Notwendigkeit abgeleitet werden, universelle Simulationssysteme für Kleinrechner des SKR zu schaffen. Eine Dienstleistungseinheit (Waschsalon) untersuchte *I. Molnar*, Budapest, simulativ; das relativ kleine System wurde mit einer GPSS-Sprache mit geringem Aufwand erfolgreich zu Analyse und Rationalisierung bearbeitet. Zur Beurteilung von Zufallszahlengeneratoren benutzte *H.-B. Bemmann*, Mittweida, Kenndaten (rel. Fehler, Schiefe, Exzeß), die zu prüfen seien, bevor solche Generatoren für Simulationen eingesetzt werden. *L. Jackisch*, Rostock, untersuchte ebenfalls Zufallszahlen, speziell Zyklen in rekursiv erzeugten Folgen. Neue Aussagen über die Zykluslänge der SIMDIS-Zufallszahlenfolgen konnten getroffen werden. Neue vergleichende Untersuchungen zur Effektivität von SIMDIS- und TOMAS-Ereignisplanungsmethoden wurden von *M. Frank*, Dresden, vorgestellt. Dabei zeigte sich, daß die Organisation des Kalenders als Ereignisfolgeplan sehr uneffektiv ist. Abhilfe: eine fest dimensionierte Datenstruktur mit Zuordnung Segment — Generator spart wesentlich Verwaltungsaufwand. Für das PS AIDOS wurde ein Thesaurus „Simulation" geschaffen, der z. Z. 1000 Literaturstellen erfaßt und mit hierarchisch gegliederten Schlagwörtern arbeitet. *Th. Schulze*, Magdeburg, berichtete über Erfahrungen und Probleme beim Aufbau des Informationsspeichers, der in Zukunft in Kooperation mit anderen Forschungskollektiven erweitert und genutzt werden sollte.

Modellierung und Simulation in der Ökonomie prägten den Inhalt der Sektion 4 (Vors.: *H. Gernert*, Berlin). Fünf Sektoren der Volkswirtschaft (wie Landwirtschaft, Bauwirtschaft, Handel) gehen in ein Planspiel ein, dessen Möglichkeiten von *A. Kreitel*, Berlin, erörtert wurden. Hierbei konnten konkrete Input-Größen frei gewählt und die Prozeßreaktionen entsprechend gütebeurteilt werden. Auf der Grundlage von Modellen der Makrodynamik erfolgte der Entwurf eines weiteren ökonomischen Spiels (*T. Hager*, Berlin) „Abstimmung zwischen sich intensiv erweitert reproduzierten Produktionseinheiten". Hier gehen in die Aufgabenstellung z. B. Produktion, Material, Investition, Bedarf ein. Die Phasen des Spiels werden unter Nutzung des Simulationssystems BORIS 1 E durchlaufen. Neben den Ansätzen für Aufgaben der Aus- und Weiterbildung gab es auch theoretisch-methodische Beiträge. So sprachen *B. Mikolajczak*, Poznań/VR Polen, über ein endliches 2-Personen-Mehrwegspiel, für das eine Hardware- und eine Software-Simulation realisiert worden sind, und *V. Nikolajew*, Berlin, über Anwendung der Modellierung und Simulation bei der systemanalytischen Untersuchung von schwachstrukturierten Problemen. Bei der Darstellung der Anforderungen an die Modellierung (Grenzen, Flexibilität) wurde der interdisziplinäre Charakter dieser Arbeiten deutlich. Bei der Entwicklung des Modellansatzes wurde u. a. auf die Bestimmung der Parameter und die Strukturierung der Datenmassive eingegangen. Praxisbezogene Beiträge stammten von *U. Hajdrowska-Mikolajczak*, Poznań/VR Polen (Große Industriezentren und ihre Versorgung mit Arbeitskräften mit den Schwerpunkten Fluktuation, Bildungsgrad und anderen soziodemographischen Faktoren), und *G. Schulze*, Rostock (Steuermodell des Konsultationsstützpunktes „Seehafen-Durchlässigkeit" bildet experimentell im Raum- und Zeitmaßstab Hafenbereiche nach mit dem Hafendurchlauf von Seeschiffen und Landtransportmitteln). Einen Übersichtsbeitrag zu Leitungssimulationsspielen gab *H. Gernert*, Berlin, der nationale Erfahrungen im Hochschulwesen der DDR sowie eine internationale Konferenz zu ökonomischen Spielen

(IIASA, Laxenburg, November 1981) auswertete.

Die Praxisvertreter stellten in der Diskussion die Forderung nach weiterer Zusammenarbeit mit Hochschul- und Akademieeinrichtungen bei der Entwicklung und dem Einsatz von Simulationsmodellen zur Lösung von Leitungs- und Planungsaufgaben der Praxis.

In Sektion 5 (Vors.: *K. Bellmann*, Berlin) wurden Vorträge zu Modellierung, Simulation und Steuerung von Ökosystemen gehalten. Die Vorträge zeigten teilweise sehr hohes theoretisches Niveau und betrafen die Darstellung von Simulationssystemen und Modellen zur dynamischen Analyse von Umweltprozessen mit Langzeitwirkung (Vorhersage von Umweltveränderungen durch Bergbau und Industrieabprodukte). *M. Kimmel*, Gliwice/VR Polen, erweiterte dynamische Modelle des Populationswachstums deterministischen Charakters auf stochastische, die auf altersabhängigen Verzweigungsprozessen in willkürlich variierender Umgebung mit Einwanderung basieren.

Die Eutrophierung eines Gewässers wird als ein spezielles Beispiel eines allgemeinen mehrdimensionalen Markov-Modells betrachtet (*J. Grimm*, Berlin). Das dieses Beispiel beschreibende deterministische DGl-System (8 Komponenten) kann den realen, stochastischen Verlauf nicht widerspiegeln. Verwendet man jedoch Schätzverfahren für Modellparameter, die in die Lösung dieses DGl-Systems eingehen, so verbessert sich die Übereinstimmung mit den Meßdaten. *M. Kimmel*, Gliwice/VR Polen, betrachtete ein stochastisches Modell des Populationswachstums mit Konkurrenz für beschränkte Nahrungsressourcen. Ein sehr vereinfachtes Modell erklärt bis zu einem gewissen Grade die Abhängigkeit der Schiefe von der Dichte. Ein weiteres, komplexeres Modell erklärt es besser, aber die begrenzenden Verteilungen müssen numerisch berechnet werden. Da die Größenstruktur der Population ihr zukünftiges Schicksal beeinflußt, ist die Größenverteilung von weiterem Interesse. Schadstoffe (im Beispiel wurde Phenol behandelt; *M. Neubert*, Jena) in Abwässern durch Mikroben abzubauen, wurde mit einem hybriden Modell untersucht. Die Kenntnis der Kinetik des Systems läßt eine Optimierung des Abbaus zu. Steuerungstheoretisch betrachtete *K.-H. Steinmüller*, Berlin, die Bekämpfung von Schaderregern in Agro-Ökosystemen. Die durch die Eutrophierung bedingte Algenentwicklung beeinflußt in starkem Maße die Qualität des Wassers. *A. Gnauck*, Berlin, untersuchte das Phytoplankton in einem Fließgewässer mit dem Ziel der Vorhersage der Wasserbeschaffenheit. Das Modell liefert hinreichend genaue Aussagen für die Praxis zur Berechnung des Planktongehaltes für beliebige Situationen, zur kurzfristigen (von der Meteorologie abhängigen) und zur langfristigen Vorhersage. *F. Heineck*, Ilmenau, untersuchte Bedingungen zur Minimierung des Algenwachstums in Boddengewässern. Ein komplexes Ökosystem-Modell für den Barther Bodden wurde von *U. Vietinghoff*, Rostock (analoger Teil), und *M. Brinckmann*, Rostock (digitaler Teil), vorgestellt. Es beschreibt Energiefluß und Stoffkreislauf des Stickstoffs (30 DGLn 1. Ordnung). Die Lösungskurven des Analogrechners (bis 15 gekoppelte MEDA 41T) stimmen gut mit den Meßwertkurven überein, die naturgemäß einen breiten Gültigkeitsbereich aufweisen. Für die Beurteilung der Güte der Zustandsvariablen-Submodelle werden 5 bis 7 Parameter herangezogen. Der durch Zusatzbaugruppen nachgerüstete Analogrechner MEDA kann mit Vorteil für die Simulation auch eines größeren Systems eingesetzt werden. Optimierungsrechnungen und curve-fitting für mehrere unzureichend bekannte Parameter wurden digital behandelt. Die hydrodynamischen Einflüsse (System nichtlinearer partieller DGln) wurden nach Vereinfachung berücksichtigt und numerisch gelöst. *U. Pociask*, Gliwice/VR Polen, stellte das Modell eines Wasserleitungssystems vor; das Versorgungssystem besteht aus Pumpstation, Wasserbecken und Rohrleitungsverbindungen. Das Modell wurde hinsichtlich Energie- und Transportkosten optimiert. Ein ähnliches Problem — ein Reservoir und ein Untersystem von Verbrauchern, durch eine statische Verbrauchscharakteristik gekennzeichnet — behandelte *A. Swierniak*, Gliwice/VR Polen, als Anwendung einer stochastischen Optimierungsstrategie. Zwei Beiträge waren zur Modellierung des Trinkwasserhaushaltes im Bereich Magdeburg (*U. Beims*, Dresden) und Leipzig-Halle (*K. Dybek*, Dresden) eingereicht worden, die die Grundwasserbewirtschaftung näher betrachteten.

Folgende Schlußfolgerungen sind für diese Sektion möglich: 1. Simulationsmodelle werden in zunehmend größerem Maße als Hilfsmittel in komplexen Leitungsentscheidungen genutzt, insbesondere durch Bereitstellung von Szenarien (Darstellung von ökonomischen und ökologischen Konsequenzen von lang- und mittelfristig wirksamen Maßnahmen). 2. Die Hauptentwicklungsrichtung im Umweltschutz stellen komplexe Simulationsmodelle dar, die die Dynamik der Technologiefolgen und ortsabhängigen Umweltveränderungen über Abproduktausbreitungsteilmodelle verknüpfen. 3. Es wird eine allgemeine nutzerfreundliche, flexible, wenn möglich interaktive Software (Simulationssprache) zur Modellierung beliebiger Ökosysteme benötigt. Es existieren zahlreiche Teilmodelle, die effektiver mit einem solchen Simulationssystem numerisch behandelbar werden.

In Sektion 6 (Vors.: *R. Straubel*, Berlin) ging es um Modellbildung und -behandlung komplexer Systeme. *R. Böttner*, Berlin, löste große dynamische Optimierungsaufgaben durch Dekomposition nach der Methode der Preis-(Ziel-) Koordinierung der Theorie hierarchischer Systeme. Das dynamische lineare Optimierungsproblem wurde durch die Dekomposition des dynamischen Problems in Subprobleme gelöst, die nur für eine Zeitperiode zu berechnen sind. Dabei fand das System OPSI Anwendung. Wie ein großes System in eine Menge gekoppelter Teilsysteme optimal (kleine Anzahl von mehreren Teilsystemen auftretender Variablen) automatisch zerlegt werden kann, untersuchte *R. Rosenmüller*, Berlin. Eine praktische Lösung für ausreichend große Dimensionen kann nur näherungsweise erfolgen (Clusteralgorithmen). Mit Benutzung einer Metrik (Tanimoto) wurden einige Algorithmen getestet und die Ergebnisse diskutiert. Bei der strukturellen Dekomposition komplexer Systeme (*A. Wittmüß*, Berlin) ist das Ziel eine Zerlegung in Teilmengen von Relationen mit einer möglichst geringen Anzahl gemeinsamer Elemente. Im Vortrag wurde die Aufgabe betrachtet, für ein gegebenes System eine optimale Zerlegung zu finden. *N. D. Tai*, Hanoi, betrachtete die Dekomposition von Optimierungsaufgaben, für die die Zielfunktion als Polynom gegeben ist. Eine Prozeßanalyse, gekennzeichnet durch Zustandsraumbeschreibung (Zusammenhang zwischen aktuellem Prozeßzustand, Einfluß der Steuergrößen und Zustandsveränderung), heißt binär, wenn alle Steuer- und Zustandsgrößen diskret und zweiwertig zu betrachten sind. *J. Alder*, Leipzig, beschrieb, was bei der Zerlegung in Teilprozesse und der Prozeßführungsstrategie zu beachten ist. Die großen Systeme, die *F. U. Simon*, Dresden, behandelt hat, sind digitale Schaltungen (LSI- und VLSI-Schaltkreise). Die Signale werden topologisch sortiert, um je Simulationsschritt und Elementeausgang nur einen externen Speicherzugriff zu benötigen (die Daten für große Systeme können im HS nicht untergebracht werden). Die topologische Sortierung erfolgt nach einem effektiven Algorithmus, Externzugriff über indexsequentielle Datei mit Sätzen variabler Länge. Das Programm (500 PL/1-Sätze) benötigt für ein Beispiel (96 000 Signale entsprechen viermal ZE 1055) 180 min. Die Analyse elektrischer Netzwerke, die auf parameterabhängige nichtlineare Gleichungssysteme führen, behandelte *G. Pönisch*, Dresden. Das Programmpaket PARSYS wurde dazu in das Analyseprogramm STADYNET integriert. Demonstriert wurden Beispiele aus der elektrischen Netzwerkanalyse. *W. W. Kalaschnikow*, Moskau, sprach über Komponenten, die im Zusammenhang mit der Simulation betrachtet werden sollten, um allgemeine Verabredungen zur Validität, Effektivität, Sensitivität usw. treffen zu können. Diese Komponenten sind: Aufstellen des Modells (mathematisches Modell; rechnergeeignetes Modell), Organisation des Simulationsexperiments und Architektur von Simulations-Software. Sie müssen als drei Schritte im Simulationsprozeß begangen werden.

Eine Podiumsdiskussion zum Thema „Gesellschaftliche Bedeutung der Mikrorechentechnik" zog am Eröffnungstag abends viele Interessierte an. Unter Leitung von Prof. *E.-G. Woschni*,

Karl-Marx-Stadt, wurde zu drei einleitenden Beiträgen auch mit dem Publikum diskutiert. In seinem Beitrag wurde von Prof. *Woschni* ein kurzer Überblick der Entwicklung der Hard- und Software mit Hinblick auf Auswirkungen auf die Volkswirtschaft gegeben. Dabei wurden Schlußfolgerungen aus Trendbetrachtungen gezogen, u. a. auch hinsichtlich der Aus- und Weiterbildung. So verringert der Heimcomputer zwar die Scheu vor dem Rechner, kann aber nicht ausreichend die Kritiklosigkeit beseitigen, die noch immer bei der Übernahme von Rechenergebnissen anzutreffen ist. Prof. *H. Meier*, Berlin, ging auf Stand und Perspektiven der Daten-Kommunikation sowie deren Bedeutung für die Gesellschaft und daraus resultierende Probleme ein. *These 1*: weitgehende Annäherung von Rechen- und Kommunikationstechnik (bei Erweiterung des Fernsprechnetzes wird es keine Unterschiede mehr zum Daten- oder zum Fernrechnernetz geben, Satellitenübertragung eingeschlossen); *These 2*: tiefgreifende Veränderungen in den Kommunikationsbeziehungen zwischen Individuen und Gesellschaft (z. B. Information als Ware; hoher Prozentsatz der Werktätigen arbeitet in der Informations- und Datentechnik). Im dritten Beitrag befaßte sich Prof. *H. Adler*, Dresden, mit der Entwicklung auf dem Gebiet der Software einschließlich der Sprachen. Noch ist eine Überbetonung der Hardware und eine Unterschätzung der Software bei uns zu verzeichnen. Die Programmierung der Mikrorechner erfolgt weitgehend im Maschinenniveau, erst allmählich setzt sich die Assemblerformulierung durch (etwa 10 unterschiedliche Assembler!), Anwendungen auf höherem Niveau sind noch relativ selten. Softwarekomponenten werden immer stärker von Hardwarelösungen abgelöst (z. B. Gleitkommaarithmetikeinheit); der Ansatz des Modularkonzeptes bewährt sich auch hier.

In der Diskussion wurden Probleme der Normierung und Kompatibilität von Programmen angesprochen, die für einen effektiven Programmaustausch notwendigen Informationsmöglichkeiten sowie Forderungen an Hard- und Software, insbesondere aus der Sicht der Anwender (z. B. Werkzeugmaschinensteuerung).

Bestandteil der Tagungsmaterialien war msr **24** (1981) Heft 11. Es enthielt auf den Seiten 602 bis 629 je einen Beitrag aus den 6 Sektionen sowie einen Plenarvortrag in Langfassung.

Eine *Ausstellung* im Konzilzimmer der Wilhelm-Pieck-Universität brachte Aktivitäten des Fachausschusses und historische Fakten dazu mit Hilfe von Schautafeln in Erinnerung. Die auch in der Studie „Allgemeine digitale Simulationssysteme — sequentielle und pseudoparallele Berechnungen" (Verf.: Prof. *G. Schwarze*, Berlin) veröffentlichten Konsultationsstützpunkte „Simulation" waren dargestellt. Man bekam einen Überblick über die allgemeinen digitalen Simulationssysteme in der DDR von 1966 bis 1981 mit kurzen Beispielen zu ausgewählten Systemen. Neben der Softwareentwicklung wurde auch eine Darstellung zur Entwicklung der Simulationstechnik gegeben, die die wichtigsten Stationen der analogen Rechentechnik von der mechanischen über die elektrisch-analoge bis zur digitalen Technik der in der DDR hergestellten Anlagen enthielt. Auch waren die thematischen Schwerpunkte der Grundlagen-Vorträge der Jahrestagungen des Fachausschusses aufgeführt und ebenso die reichliche Skala der Anwendungssektionen der vergangenen 10 Jahrestagungen. Die Teilnehmerzahl hat 1981 erstmalig die Grenze von 300 (davon 25 aus RGW-Staaten) überschritten, auf die aber die künftigen Jahrestagungen beschränkt bleiben sollten, um eine vernünftige Aufwands-„Nutzen"-Relation beizubehalten. Bei 50 bis 60 Vorträgen je Tagung muß ohnehin schon mit drei Sektionen parallel operiert werden, was zur Sicherung eines freien Wechsels zwischen den Sektionen hohe Disziplin der Referenten und der Sektionsvorsitzenden verlangt, die hier allen Aktiven mit Dank bescheinigt werden kann.

Eine Auswahl von Fachbüchern zur Thematik Modellierung/Simulation lag zum Durchblättern ebenso bereit wie Beschreibungen und Handbücher von Basissoftware, mit deren Herstellern die Nutzer unmittelbar in Kontakt treten konnten.

An dieser Stelle soll die gute langjährige Zusammenarbeit zwischen dem Tagungsleiter und den verantwortlichen Mitarbeitern im Präsidium der KDT hervorgehoben werden; sie hat entscheidenden Einfluß auf das Gelingen dieser Tagungen, und es bleibt nur zu wünschen, daß Vorbereitung und Durchführung weiterhin in bewährten Händen liegen.

Zur 11. Jahrestagung (14. bis 16. Dezember 1982) mit den Schwerpunkten Modellierung und Simulation in der Verfahrenstechnik und von Wärmeprozessen, in der Elektrotechnik und Elektronik in der Entwurfs- und Testphase sowie zu Optimierung in Modellbildung/Simulation werden noch Beiträge erbeten, ebenso zu Simulation kontinuierlicher, diskreter bzw. kombinierter Modelle.

msr 7623 *H.-J. Bartsch*

Pressegespräch anläßlich der 10. Jahrestagung „Grundlagen der Modellierung und Simulationstechnik" am 9. Dezember 1981 in Rostock

Im Rahmen der 10. Jahrestagung „Grundlagen der Modellierung und Simulationstechnik" führten die Veranstalter (Fachausschuß 9 „Modellierung" der WGMA unter Mitwirkung des Zentralinstitutes für Kybernetik und Informationsprozesse der AdW der DDR und der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock) ein Pressegespräch durch. Anwesend waren Prof. Dr. rer. nat. *A. Sydow* (ZKI der AdW, Vorsitzender des FA 9), Dr.-Ing. *H.-J. Bartsch* (WPU Rostock, Tagungsleiter), Prof. Dr.-Ing. habil. *H. Adler* (IH Dresden), Dipl.-Ing. *K. Kabeš* (ZPA Čakovice/ČSSR), Dr. rer. nat. *M. Wagner* (VEB Chemieanlagenkombinat Leipzig—Grimma und Dipl.-Ing. *K.-D Müller* (WGMA-Vorstandsmitglied) sowie Vertreter von Fach- und Tagespresse. Die Veranstaltung diente der Vermittlung von Zusatz- und allgemeinen Informationen über Inhalt und Bedeutung der Modellierung und Simulation und über die Entwicklung der Jahrestagungen.

Einleitend informierte Prof. *Sydow* über die „Historie" des Fachausschusses und, parallel dazu, der Jahrestagung. Er konnte dabei auf eine etwa 20jährige erfolgreiche und hinsichtlich ihrer volkswirtschaftlichen Ausstrahlung ständig anwachsende Tätigkeit zurückblicken. Eindringlich verwies er auf die Relevanz der Modellbildung und machte deutlich, wie deren Entwicklung bis hin zur Behandlung großer Systeme eng mit der Entwicklung der modernen Rechentechnik verknüpft ist. Modellierung und Simulation als Voraussetzung und Basis für Entscheidungsfindungen, Optimierungen und Entwurfsstrategien in allen Lebensbereichen — dafür gilt es, ein breites gesellschaftliches Verständnis zu fördern, um das sich WGMA und FA 9 im Rahmen ihrer Öffentlichkeitsarbeit, so z. B. mit der Jahrestagung, aber auch durch die Arbeit in den Konsultationsstützpunkten, bemühen. Als wichtige Projekte stehen derzeit unter anderem die Einbeziehung der Methoden der künstlichen Intelligenz in die Phase des Modellierens, der Aufbau von Datenbanken (besonders im Hinblick auf große Systeme, z. B. umfassende betriebliche, territoriale oder volkswirtschaftliche Abläufe oder gar große ökologische Systeme bis hin zu den — allerdings umstrittenen — Weltmodellen) und Simulationssysteme für Robotersteuerungen zur Debatte. Damit eröffnen sich für die Modellbildungsbestrebungen neue Dimensionen.

Diese Ausführungen von Prof. *Sydow* wurden durch die nachfolgende Diskussion unterstützt und ergänzt. So widmete sich Prof. *Adler* der Softwareproblematik (dem sich rückläufig entwickelnden Verhältnis von Hardware- zu Softwareleistungen und -kosten) und ihren absehbaren Konsequenzen. Dr. *Wagner* nannte Beispiele für den Einsatz von Computersimulationen im Chemieanlagenbau.

Dipl.-Ing. *Kabeš* würdigte die langjährige fruchtbare Zusammenarbeit zwischen der DDR und der ČSSR, vornehmlich auf dem Sektor der Rechnerentwicklung bis hin zum Hybridrechnersystem HR 5000. Dr. *Bartsch* und Dipl.-Ing.

Müller verwiesen nochmals auf die Wirkung der Jahrestagung, die in jedem Jahr auf einen anderen Industriezweig zugeschnitten ist und somit spezielle Impulse vermittelt. Abgerundet wurde die informative Veranstaltung durch eine Reihe von Sichttafeln, die über Wissenswertes zum FA 9, zu den Konsultationsstützpunkten und zur Entwicklung der Jahrestagungen Auskunft gaben. *D. Werner*

Aus der Arbeit des FA „Zuverlässigkeit automatisierter Systeme"

Die 13. wissenschaftliche Arbeitstagung des FA „Zuverlässigkeit automatisierter Systeme" der WGMA stand unter dem Thema „Zuverlässigkeitsbetrachtungen von leistungsorientierten Systemen". Damit wurden Arbeitsergebnisse des III. Symposiums Zuverlässigkeit an der TH „Otto von Guericke" Magdeburg im September 1981 und der 5. Zuverlässigkeitstagung des Fachverbandes Elektrotechnik der KDT im Oktober 1981 in Dresden aufgegriffen und weiterführend diskutiert.

Die fortschreitende Rationalisierung in allen Bereichen der Volkswirtschaft zwingt verstärkt zur Beschäftigung mit der Zuverlässigkeit von Produktionssystemen (Fertigungssysteme, Systeme der Chemie, Nachrichtensysteme usw.). Dabei sind die Beantwortung der Frage nach dem Einfluß der Zuverlässigkeit auf die Leistungsfähigkeit und die Ableitung von Anforderungen an Zuverlässigkeit, Instandhaltung, Prüfung, Strukturierung und technologische Betriebsführung aus den geplanten Leistungsvorgaben bzw. Leistungsanstiegen von Bedeutung.

Die Diskussionsgrundlage wurde durch Vorträge von *K. Fischer* (HfV „Friedrich List" Dresden): *Zuverlässigkeitsbetrachtungen von Leistungssystemen*, *L. Friedrich* (IH Wismar): *Zur Abhängigkeit des Mengen- und Zeitverhaltens von industriellen Ausrüstungen und speziellen Fertigungsprozessen von der Zuverlässigkeit* und *H. Kardos / K. Lorenz* (IH Köthen): *Zuverlässigkeit von Leistungssystemen am Beispiel von Chemieanlagen* gelegt.

Wesentliche Ergänzungen und Vertiefungen wurden in den Vorträgen von

G. Hertel (HfV Dresden): *Zusammenhänge zwischen Nichtverfügbarkeit der Kanäle und Warteschlangen der Kunden*, *A. Wölfel* (HfV Dresden): *Schlangenentwicklung in Wartesystemen nach Störungseintritt und Instandsetzung der Kanäle*, *G. Bock* (IH Wismar): *Quantifizierung des Einflusses von Lagerhaltungssystemen auf die Zuverlässigkeit von Fertigungsprozessen*, *M. Grün* (IH Wismar): *Zur praktikablen Bestimmung der Stabilität spezieller Fertigungsprozesse* sowie *E. Brückner* (HfV Dresden): *Fragen der technologischen Stabilität bei der Durchführung von Zugfahrten* und *J. Kleinert* (Brennstoff-Institut Freiberg): *Strukturierung und Instandhaltungsorganisation großer Produktionssysteme mit Hilfe mathematischer Verfügbarkeitsmodelle* gegeben.

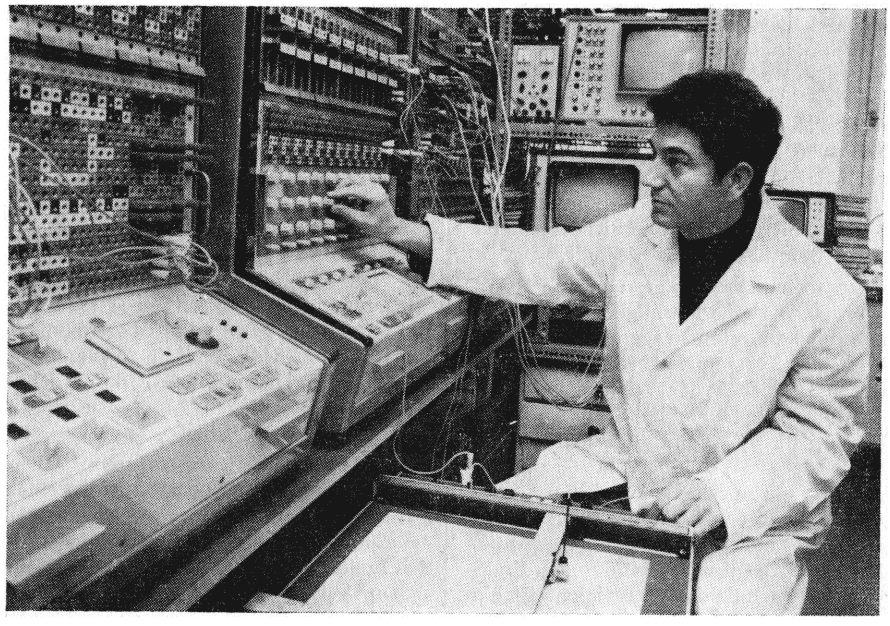
In der Diskussion wurde herausgearbeitet, daß national und international die Zuverlässigkeitsbetrachtungen schwerpunktmäßig auf Systeme konzentriert sind, bei denen im wesentlichen die Fragen nach der Wahrscheinlichkeit für den funktionsfähigen oder ausgefallenen Zustand zu beantworten sind. In dem Maße, wie man sich Produktionssystemen zuwendet, ist die Frage nach der Leistungsfähigkeit bzw. dem Leistungsausstoß und welche Rolle dabei die Zuverlässigkeit spielt entscheidend. Die 13. wissenschaftliche Arbeitsberatung ließ deutlich erkennen, daß in der jüngsten Vergangenheit Zuverlässigkeitsbetrachtungen von Systemen dieser Art durchgeführt wurden und dabei bereits auch beachtenswerte Ergebnisse erzielt werden konnten. Trotzdem muß die Arbeit in dieser Richtung als ein Beginn eingeschätzt werden, der einer weiteren intensiven Forschungsarbeit bedarf.

Da bei Produktionssystemen die Veränderung des Produktionsausstoßes von entscheidender Bedeutung ist, kann diese Frage nicht befriedigend beantwortet werden, wenn man als Grundlage der Betrachtung die Verfügbarkeit bzw. Nichtverfügbarkeit wählt.

Vielmehr müssen alle Systemzustände mit einem unterschiedlichen Leistungsausstoß in die Betrachtung einbezogen werden, was die Verwendung von Mehrzustandsmodellen zwingend notwendig macht. Die Zuverlässigkeitsbetrachtungen von Produktionssystemen liefern eine effektive Entscheidungsgrundlage, wenn die Zuverlässigkeitsanforderungen als unabhängige Variable verwendet werden. Damit kann die Auswirkung einer Veränderung der Zuverlässigkeitsanforderungen auf den Leistungsausstoß deutlich sichtbar gemacht werden, wodurch sich günstige Möglichkeiten bieten, die Änderung der Zuverlässigkeitsanforderungen ökonomisch zu bewerten.

Als ein wesentlicher Gedanke wurde noch herausgearbeitet, daß die Zuverlässigkeitsbetrachtungen sowohl hinsichtlich des Hersteller- bzw. Betreiberstandpunktes als auch hinsichtlich des Nutzerstandpunktes erfolgen müssen.

Die Umsetzung und Weiterführung des vorgestellten Konzeptes stellt eine Bereicherung mindestens der Wissenschaftsdisziplinen Zuverlässigkeits-, Bedienungs-, Nachrichtenverkehrs-, Instandhaltungs- und Erneuerungstheorie dar und hat damit Bedeutung für die Volkswirtschaft, die Aus- und Weiterbildung sowie allgemein für das theoretische Niveau. msr 7597 *K. Fischer*



Bei der Durchführung wissenschaftlicher Experimente vergrößert die automatische Behandlung der experimentellen Daten und die ständige Verfügbarkeit der Ergebnisse die Wirksamkeit der Forschungsarbeit. Gleichzeitig wird der Bearbeitungszeitraum beträchtlich gesenkt.
Das Bild zeigt eine Rechnermodellierung hydrodynamischer Prozesse in einem chemischen Reaktor im Zentrallaboratorium für theoretische Grundlagen der chemischen Technologie an der Bulgarischen Akademie der Wissenschaften.
Foto: ADN-ZB

Moderne Nachrichtensysteme und -mittel

In Moskau fand im Sokolnikipark vom 2. bis 16. September 1981 die zweite internationale Ausstellung „Swjas 81" statt. An ihr nahmen 23 Länder, 530 ausländische Firmen und über 220 sowjetische Organisationen teil, die sowohl eigene als auch gemeinschaftliche Entwicklungen von Weltniveau präsentierten.

Thematische Abteilungen der Ausstellung waren: Satellitenfunkverbindungen, Fernsehen und Rundfunk, Endgeräte, Nachrichtenkanäle und Nachrichtennetze, Meßtechnik, Postwesen, elektronische Bauelemente und Materialien für Nachrichtengeräte.

Die Entwicklung der Satellitennachrichtenverbindungen wurde am vollständigsten und vielseitigsten in der Abteilung der Sowjetunion gezeigt. Diese Verbindungen gehören zum einheitlichen automatisierten Nachrichtensystem der UdSSR. Die inländischen Satellitenverbindungen basieren auf einem Netz stationärer Satelliten der Typen „Molnija", „Raduga", „Ekran". Die grundlegenden Vorzüge der Satelliten-Nachrichtensysteme sind:

- hohe Anzahl von Verbindungskanälen
- große Kanalkapazität
- Möglichkeit der gleichzeitigen Verbindung von Tausenden von Teilnehmern.

Gegenwärtig werden in vielen Ländern der Erde erfolgreich regionale und staatliche Satellitensysteme genutzt.

In der UdSSR wurde 1965 mit der Schaffung von Satellitennachrichtenverbindungen begonnen, und zwar auf der hochelliptischen Umlaufbahn des Sputniks „Molnija I", der im Dezimeterwellenbereich arbeitet. Moderne sowjetische Sputniks sichern die Übertragung des zentralen Fernsehens und der Zeitungsmatrizen in alle Territorien des Landes. Kosmisches Fernsehen wurde zum ersten Mal 1960 realisiert, und 1979 wurde in der UdSSR zum ersten Mal in der Welt eine zweiseitige Fernsehverbindung zwischen Leitzentrum und wissenschaftlicher Orbitalstation hergestellt.

Bekanntlich beschäftigten sich im RGW eine ganze Reihe ständiger Kommissionen mit konkreten Fragen der Entwicklung der Zusammenarbeit in verschiedenen Bereichen der Wissenschaft und Technik, unter ihnen die Ständige Kommission für Post- und Fernmeldewesen (KPF) der RGW-Länder. Ihre Grundaufgabe ist die maximale Befriedigung der Bevölkerung der RGW-Staaten mit den Dienstleistungen Telefon, Telegrafie, Post und Rundfunkverbindungen. Praktisches Ergebnis dieser Tätigkeit ist ein großer Umfang modernster Technik von Weltniveau, sowohl aus nationaler als auch aus gemeinschaftlicher Fertigung.

Gegenwärtig versorgt das internationale Nachrichtensatellitensystem „Intersputnik" mit sowjetischen Sputniks des Typs „Stationar" die VR Albanien, die VR Bulgarien, die Ungarische VR, die DDR, die Republik Kuba, die Mongolische VR, die SR Vietnam, die ČSSR und die UdSSR mit Telefon-, Telegrafie- und Bildtelegrafieverbindungen sowie Fernseh- und Rundfunkprogrammen.

1979 trat die Konvention über die Organisation des internationalen Schiffahrts- und Satellitenfernmeldeverkehrs im Rahmen der Organisation „Inmarsat" in Kraft. Nach diesem System wird auf den Weltmeeren zwischen 70° nördlicher und 70° südlicher Breite der Fernmeldeverkehr mit Schiffen realisiert, mit dem Ziel der Signalisierung von Schiffsunglücken, der Rettung von Menschenleben auf dem Meer und der Erhöhung der Effektivität der Arbeit und der Führung von Schiffen. Die Nachrichtenverbindungen erfolgen im Zentimeterwellenbereich. Zur Organisation gehören 28 Länder.

Auf der Ausstellung wurde auch ein breites Sortiment von Fernseheinrichtungen gezeigt. In der Regel war dies Technik der dritten Generation, die durch umfangreiche Anwendung integrierter Schaltkreise gekennzeichnet ist, durch welche hohe Stabilität der Kennwerte bei Dauerbetrieb gesichert, die Zuverlässigkeit erhöht und ein anwenderfreundlicher Betrieb gewährleistet werden.

Die Ausstellung zeigte, daß die Arbeiten an Lichtleiter-Nachrichtenübertragungsstrecken aus dem Stadium der Labor- und Experimentierbearbeitung in das der Fertigung übergegangen sind. Leitungen und Zubehör, aber auch Varianten zur Anwendung in Rechnern und elektronischen Geräten demonstrierten Hersteller Japans, der DDR, der Ungarischen VR, der UdSSR und anderer Länder.

Die japanische Firma NEC verwendet Lichtleiter vom Typ SELFOC, in der DDR wendet man Quarzlichtleiter mit einer Dämpfung von 5 dB/km bei einem Durchmesser von 0,13 mm an.

Die UdSSR demonstrierte:

- die Lichtleiter-Nachrichtenübertragungseinrichtung WOLS-IM-120 mit folgenden Daten: Übertragungsfrequenz 8448 Kbit/s, Wellenlänge 0,85 μm, Dämpfung 5 dB/km, Lichtleiterabmessungen 150/80 μm, 12 Lichtleiter im Kabel
- den breitbandigen elektrooptischen Lichtmodulator GD-339, mit einer Modulationsmittenfrequenz von 700 MHz, einer Modulationsbandbreite von 200 MHz und einem optischen Kontrast von 100:1
- ein optisches Lichtleiter-Ringverbindungssystem mit 10 Verbindungspunkten, einer übertragbaren Informationsfrequenz jedes Punktes von 800 Kbit/s, einer Fehlerwahrscheinlichkeit $< 10^{-9}$ im System und einer zulässigen Kabellänge zwischen den Punkten < 200 m.

Breiten Raum nahmen auf vielen Ständen elektronische Meßgeräte ein. Auf diesem Gebiet gibt es die Tendenz, die Daten von Messungen verschiedenartiger physikalischer Größen über eine Frequenzmessung zu erfassen, weil dieser Meßprozeß am genauesten ist. Die ausgestellten Exponate ermöglichen die Messung im Bereich von Bruchteilen eines Hz bis 70 GHz.

Der technologische Prozeß der modernen Postbearbeitung ist recht kompliziert. In automatischen Linien werden Maschinen angewandt, die Briefe nach ihren Abmessungen sortieren, Adressen lesen, stempeln und nach vorgegebenem Programm anhand von Leitzahlen sortieren. Die sowjetische Einrichtung zum Erkennen der Leitzahlen UOI arbeitet mit einer Leistungsfähigkeit von 28000 Briefen je Stunde.

Auf der Ausstellung wurde eine große Anzahl verschiedenartiger elektronischer Bauelemente gezeigt. Die generelle Entwicklungsrichtung dieses Zweiges ist charakterisiert durch Anwendung der Festkörperelektronik, die Miniaturisierung, hohe Zuverlässigkeit und breite funktionelle Möglichkeiten der Geräte gewährleistet. Gegenwärtig entwickeln die Spezialisten dieses Bereiches integrierte Schaltungen mit einem Integrationsgrad von 1 Mill. Elementen je Kristall.

Die Analyse der Materialien des Symposiums, das während der Ausstellung durchgeführt wurde, und die technische Charakteristik der Exponate gestatten Schlußfolgerungen über Entwicklungsrichtungen moderner Nachrichteneinrichtungen und Systeme:

- Satellitennachrichtenverbindungen wurden zur Hauptentwicklungsrichtung für internationale Telefon-, Telegrafie-, Rundfunk- und Fernsehverbindungen. Mit ihrer Hilfe werden auch verschiedene Informationsaufgaben in der Volkswirtschaft, bei der Navigation, bei der Rettung von Menschen auf dem Meer, bei der Führung von Schiffen sowie fliegenden und kosmischen Objekten gelöst. Diese Arbeiten werden in den RGW-Ländern besonders intensiv durchgeführt.
- Auf dem Gebiet der Nachrichtensysteme werden verstärkt Forschungen und praktische Arbeiten zur Einführung der Lichtleitertechnik, der Mikroelektronik, zur Beherrschung neuer Bereiche für Funkver-

bindungen, zur Erhöhung der Zuverlässigkeit der Geräte und ihrer funktionellen und ergonomischen Möglichkeiten durchgeführt.
- Bei den schaltungstechnischen Lösungen der Exponate ist ein hoher Grad der Vereinheitlichung zu beobachten, so z. B. in Stationen, die zeitmultiplex arbeiten (DDR). Sie erreicht 80 bis 90% für gleichartige Baugruppen und 40 bis 60% für gleichartige Systeme.
- Die Aufgabe zur Erhöhung der Aufnahmequalität von Primärausgangsinformationen in Nachrichtensystemen spielt eine führende Rolle, weil dadurch die Effektivität der Funktion des Systems insgesamt erhöht wird. Perspektivische Richtung ist hierbei die Verwirklichung der direkten Kommunikation Mensch — Maschine mit natürlicher Sprache. Auf der Ausstellung wurden Entwicklungen zu diesem Gebiet gezeigt, z. B. der sowjetische Sprachsynthetisator, bestimmt für die automatische Synthese russischer Sprache nach Texten in der Qualität von Rechnerausgabeeinheiten. Das japanische System zur Spracherkennung der Firma NEC kann als Informationseingang für Rechner genutzt werden. Der Wortschatz von 120 Wörtern kann auf bis zu 1000 erweitert werden.
- Qualitative Veränderungen sind auch auf dem Heimtechniksektor zu beobachten. Es erscheinen z. B. Telespiele, deren Kennwerte mit denen der Studiotechnik vergleichbar sind.

Literatur

Offizieller Katalog der Ausstellung „Swjas 81", Moskau 1981.

msr 7619 *V. M. Goruchin*

Anwendung der Rechentechnik und automatisierter Steuerungssysteme im Gesundheitswesen

Vom 13. bis 15. Oktober 1981 fand in Moskau die Allunionskonferenz „Anwendung mathematischer Methoden der Rechentechnik und automatisierter Steuerungssysteme (ASU) im Gesundheitswesen" statt.

Auf der Konferenz erörterten führende Spezialisten dieser Fachgebiete Erfolge und Grundrichtungen der weiteren Entwicklung und Vervollkommnung der wissenschaftlichen und praktischen Arbeit in diesem Bereich.

Das Eindringen neuer Materialien und neuer Medizintechnik in die ärztliche Praxis führte zu einer bedeutenden Erweiterung von Informationen für die Behandlung. Die Medizin kommt heute schon nicht mehr ohne Nutzung von Informationssystemen mit umfangreicher Anwendung der Mathematik, der Rechentechnik und von Automatisierungsmitteln aus.

Die Arbeitserfahrungen dieses Bereiches wurden auf der Konferenz in 129 Berichten zu folgenden Schwerpunkten dargelegt:
- Fragen der Methodologie und gesellschaftlichen Forschung
- Informationsversorgung für ASU
- Mathematisch-technische Absicherung und Programmierung von ASU
- Fragen der Modellierung
- Automatisiertes Informationssystem für spezialisierte Dienste
- ASU für medizinische Dienststellen

In den Vorträgen wurde hervorgehoben, daß die Grundrichtung bei der Erhöhung der Effektivität der Arbeit auf diesem Gebiet die Erarbeitung und Einführung eines zweigspezifischen Steuerungssystems „Gesundheitswesen" (OASU) ist. Sein Ziel ist die Bearbeitung von Informationen zur Bereitstellung der erforderlichen Daten für den Steuerungsmechanismus, der diese zur Lösung von Planungsaufgaben und für die Leitung des Gesundheitswesens auf der Unions-, Republik-, Gebiets- und Stadtebene, aber auch in einzelnen Krankenhäusern, Kliniken und Instituten nutzt. Unter Zusammenfassung von klinischen, sanitär-prophylaktischen und einer Reihe anderer Maßnahmen soll das System die Vergrößerung des Umfanges und die Erhöhung der Qualität der medizinischen Hilfe für die Bevölkerung ermöglichen.

Auf der Konferenz wurden solche Untersysteme OASU, wie: „Medizinstatistik", „Sanitärepidemiologie", „Kader", „Apothekenwesen", „Medizintechnik" und andere betrachtet. Zu jedem Untersystem wurden konkrete Arbeiten verschiedener Autorenkollektive erörtert.

Im Rahmen der Arbeiten für den sanitär-epidemologischen Dienst wurde erstmals ein Grippemodell erarbeitet und angewendet, das eine zahlenmäßige Prognose über Beginn, Entwicklung und Abklingen der Epidemie gestattet. Erarbeitete und eingeführte Informations- und Auskunftssysteme über die Bestände von Arzneien in den Apotheken der Großstädte auf der Basis von EDV-Anlagen der 3. Generation ermöglichen die Ausgabe operativer Informationen über die Arzneimittelbestände aller Apotheken zu einem konkreten Zeitpunkt und hinsichtlich der Nomenklaturen.

In den Vorträgen, die der automatisierten Steuerung medizinisch-stationärer Behandlung gewidmet waren, wurde festgestellt, daß automatisierte Leitsysteme auf diesem Niveau geeignet sind, wesentliche medizinische Tätigkeiten in Krankenhäusern zu modernisieren und das Erreichen eines maximalen Effektes durch Einfluß der Krankenhäuser auf die Gesundheit der Bevölkerung zu sichern.

Große Aufmerksamkeit wurde der prophylaktischen Kardiologie gewidmet. Insbesondere wurde der Fall der Reihenuntersuchung der Bevölkerung mit Hilfe eines Systems auf der Basis von Kleinrechnern betrachtet, das im Dialogregime „Maschine — Patient" arbeitet. Das System gestattet es, Herzkranke zu diagnostizieren und eine ganze Reihe anderer Herz- und Gefäßerkrankungen durch automatisierte EKG-Analysen festzustellen.

Viele Vorträge waren praktischen Fragen der Erarbeitung und Einführung der Untersysteme OASU „Schnelle Hilfe", „Schiffsmedizinischer Dienst", „ASU für Pädiatrie", „ASU großer städtischer Krankenhäuser", „ASU für spezielle medizinische Hilfe in dringenden Fällen" und anderen gewidmet.

Betrachtet man die Erarbeitung automatisierter Leitsysteme im Gesundheitswesen als Komplexproblem, dann muß bemerkt werden, daß sie alle Seiten der praktischen und wissenschaftlichen Tätigkeiten der Medizin auf dem Gebiet der Erhöhung der Qualität der medizinischen Hilfe der Bevölkerung umfassen.

Auf der Konferenz gab es auch Hinweise auf Schwierigkeiten, die bei der Erarbeitung der Untersysteme OASU verschiedener Ebenen anzutreffen sind. Zu ihnen gehören:
- die Notwendigkeit, bei der Erarbeitung widersprüchliche Forderungen zu berücksichtigen
- das Vorhandensein eines komplizierten logischen Apparates
- der äußerst große Umfang der Informationsbasis
- das Vorhandensein unsicherer Parameter, z. B. menschlicher Tätigkeit
- die Unzulänglichkeiten spezialisierter Ausrüstung zur primären Informationsaufnahme
- die Notwendigkeit der Verwendung von Technik mit hoher Zuverlässigkeit
- Kaderfragen.

Die durchgeführte Konferenz stieß auf das große Interesse der sowjetischen und ausländischen Spezialisten. Die Realisierung der angenommenen Empfehlungen und Vorschläge wird zur weiteren Vervollkommung und erfolgreichen Einführung automatisierter Steuerungssysteme auf diesem Gebiet beitragen.

Literatur

[1] Stand und Perspektiven der Entwicklung automatisierter Steuerungssysteme und Anwendung der Rechentechnik im Gesundheitswesen. Handbuch wissenschaftlicher Abhandlungen, Moskau 1980.

[2] Anwendung mathematischer Methoden, der Rechentechnik und automatisierter Leitsysteme im Gesundheitswesen. Leitsätze zu den Vorträgen zur wissenschaftlichen Allunionskonferenz 13. bis 15. Oktober 1981, Moskau 1981.

msr 7626 *V. M. Goruchin*

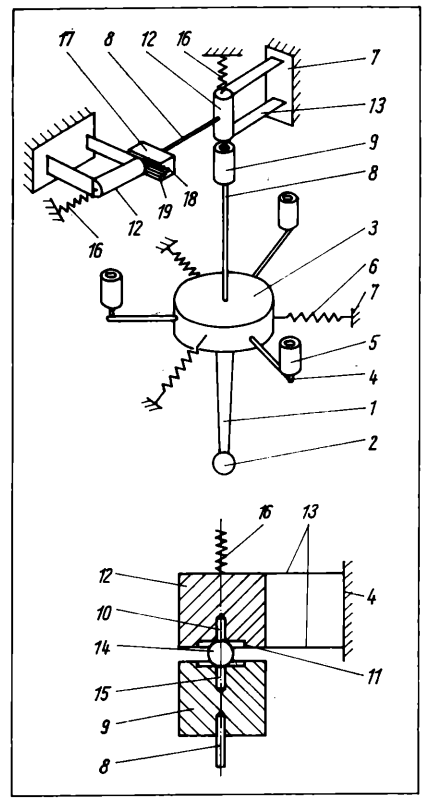
Einrichtung zur Einstellung von Tastern

DDR-WP 140789, Int. Cl. G 01 B 5/00, 6 Anspruchspunkte, 5 Zeichnungen. Anmeldung: 31. Januar 1979. Ausgabe: 26. März 1980. Inhaber: *W. Lotze, U. Teichmann*

Die Erfindung betrifft eine Einrichtung zur Einstellung von Lage, Meßkraft und Freihub an Tastern zur mehrachsigen Wegmessung für Anwendungen in der Längenmeßtechnik sowie für Steuer- und Regelungsaufgaben. Das Ziel der Erfindung besteht in der Erhöhung der Meßqualität.

Der Taster besteht aus einem Tasterschaft *1*, einer Tastkugel *2*, einem Teller *3* und drei in der Tellerebene um 120° versetzt angeordneten induktiven Wegmeßumformern mit Ferritkernen *4* und Spulen *5*. Die Ferritkerne *4* sind parallel zueinander und zur Achse des Tasterschaftes angeordnet. Die Spulen sind an einen elektronischen Rechner angeschlossen.

Der Teller *3* ist in drei um 120° versetzt angeordneten, radial gespannten Schraubenfedern *6* federelastisch am Gehäuse *7* aufgehängt. Stirnseitig ist am Teller *3* in Verlängerung des Tasterschaftes *1* ein erster Federstab *8* befestigt. Sein Ende trägt ein Zylinderstück *9*. Das Zylinderstück hat stirnseitig eine Bohrung *10* und einen Bund *11*. Gleichachsig und spiegelbildlich zu ihm ist ein analog ausgebildetes Gegenlager *12* angeordnet. Es wird



1 Tasterschaft; *2* Tastkugel; *3* Teller; *4* Ferritkerne; *5* Spulen; *6* Schraubenfedern; *7* Gehäuse; *8* Federstab; *9* Zylinderstück; *10* Bohrung; *11* Bund; *12* Gegenlager; *13* Parallelfedern; *14* Kugel; *15* Bohrungen; 16 Feder; 17 Quaderstück; 18 Längsnut; *19* Längsrand

von zwei Parallelfedern *13*, die mit dem Gehäuse verbunden sind, parallel zur Federstabachse geführt. Zwischen dem Zylinderstück *9* und dem Gegenlager *12* befindet sich eine Kugel *14*. Sie liegt in den Bohrungen *15*. Eine Feder *16* hält die Teile unter Vorspannung.

Im Bereich kleinster Auslenkungen in x-, y-Richtung bleibt die Kugel in den Bohrungen liegen. Die Meßkraft an der Tastkugel wird wesentlich durch die Federcharakteristik des 1. Federstabes *8* bestimmt und steigt in diesem Bereich linear mit der Auslenkung an. Erst bei größeren Auslenkungen rollt die Kugel aus den Bohrungen, maximal bis zum Rand *11*. Die Federn sind so aufeinander abgestimmt, daß sich die Meßkraft in diesem Freihubbereich nicht wesentlich ändert. Der Randdurchmesser ist so an die Durchmesser von Kugeln und Bohrungen angepaßt, daß der Taster auch nach der größeren Auslenkung unter dem Druck der Federkräfte selbsttätig in die Nullage zurückgestellt wird.

Für präzise Messungen in z-Richtung wird am Gegenlager *12* ein zweiter Federstab *8* in Verlängerung der Parallelfedern *13* befestigt. Er trägt am Ende ein Quaderstück *17* mit horizontaler Längsnut *18* und beiderseitigem Längsrand *19*. Gegen das Quaderstück *17* ist ein weiteres Gegenlager *12* gespannt. Zwischen beiden befindet sich eine weitere Kugel *14*.

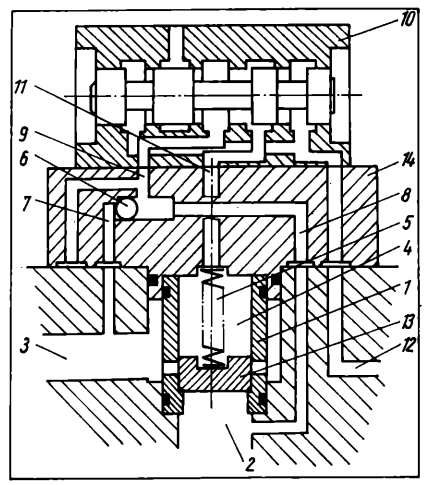
msr 7523

Hydraulische Schaltung zur Realisierung der Funktion eines entsperrbaren Rückschlagventils

DDR-WP 140779, Klasse F 15 B, Gruppe 13/02, 4 Anspruchspunkte, 2 Zeichnungen. Anmeldung: 14. Dezember 1978. Ausgabe: 26. März 1980. Inhaber: *M. Zech, J. Krößmann*

Die Erfindung betrifft eine hydraulische Schaltung zur Realisierung der Funktion eines entsperrbaren Rückschlagventils vorzugsweise in Verbindung mit Hydrologikventilen. Das zu steuernde und zur Steuerung verwendete Medium kann sowohl gasförmig als auch flüssig sein.

Das Hydrologikventil *1* besitzt einen radialen Hauptanschluß *3* und einen zentralen Hauptanschluß *2* und wird durch die Feder *5* während der Ruhestellung in geschlossenem Zustand gehalten. Der Druck in den Hauptanschlüssen *2* und *3* liegt über die Anschlüsse *7* und *8* am ODER-Ventil *6* an. Der jeweils höhere



1 Hydrologikventil; *2*, *3* Hauptanschlüsse; *4* Federraum; *5* Feder; *6* ODER-Ventil; *7*, *8*, *9*, *11*, *12* Anschlüsse; *10* Wegeventil; *13* Kegel; *14* Flansch

Druck von den Anschlüssen *7* und *8* liegt über den Anschluß *9*, das Weger ventil *10* und den Anschluß *11* im Federraum *4* des Hydrologikventils *1* an. De-Druck unterstützt die schließende Kraft der Feder *5*. Die Flächenverhältnisse am Kegel *13* garantieren, daß weder das Medium vom Hauptanschluß *2* zum Hauptanschluß *3* noch umgekehrt fließen kann. Wenn das Wegeventil *10* betätigt wird, ist der Federraum *4* über den Anschluß *11*, das Wegeventil *10* und den Anschluß *12* mit dem Tank verbunden. Das Hydrologikventil *1* ist dann geöffnet. Die Drücke in den Hauptanschlüssen *2* oder *3* heben den Kegel *13* gegen die Kraft der Feder *5* an und garantieren den freien Durchfluß. Das ODER-Ventil *6* ist im Flansch *14* und das Wegeventil *10* auf diesem Flansch montiert.

msr 7502

Anordnung zur Datentransformation in komplexen Prozeßsteuerungseinrichtungen

DDR-WP 140689, Int. Cl. G 06 F 3/00, 7 Anspruchspunkte, 6 Zeichnungen. Anmeldung: 14. Dezember 1978. Ausgabe: 13. März 1980. Inhaber: *D. Schallehn*

Die Erfindung betrifft eine Anordnung zur Datentransformation in komplexen Prozeßsteuerungseinrichtungen, deren Einsatzbereich die Großautomatisierung und bedingt die Mittelautomatisierung ist. Dabei steht die Informationsgewinnung und -verdichtung sowie der ergonomisch vorteilhaft gestaltete Informationsaustausch mit dem Operateur im Mittelpunkt: die Einbeziehung des regelungs- und des steuerungstechnischen Teils der Leiteinrichtung ist durch direkte gerätemäßige Kopplung möglich. Durch die Erfindung soll die Prozeßdatentransformation durch eine geeignete Struktur von der Meßwertgewinnung bis zur Ausgabe an das Bedienpersonal so gestaltet werden, daß

- sie sowohl als selbständiges Informationssystem als auch im Zusammenwirken mit parallelen Systemen zur Regelung und zum Anlagenschutz realisiert werden kann
- neben der elementaren Erfassung und Ausgabe von Prozeßdaten sowie neben den bekannten Aufgaben der Protokollierung und Bilanzierung auch höhere Informationsverarbeitungsalgorithmen, wie der Situationsverarbeitung, der situationsabhängigen Anwahl komplexer Handlungsalgorithmen, der Analyse der Bedienhandlungen und gegebenfalls deren Unterdrückung, der semiakustischen Dialogführung mit dem Personal zu den genannten Aufgabenklassen, realisiert werden können
- die Kommunikation mit dem Bedienpersonal funktionell und konstruktiv so gestaltet werden kann, daß die vorgenannten Aufgabenklassen bei gleichzeitiger quantitativer Reduzierung des Informationsangebotes gelöst werden kann
- die Hilfsenergieversorgung, die systeminternen Redundanzen sowie die Zuverlässigkeit der Systemkomponenten dahingehend gestaltet werden, daß die Vorrichtung zur Datentransformation unter Betriebsbedingungen die erforderliche Zuverlässigkeit aufweist.

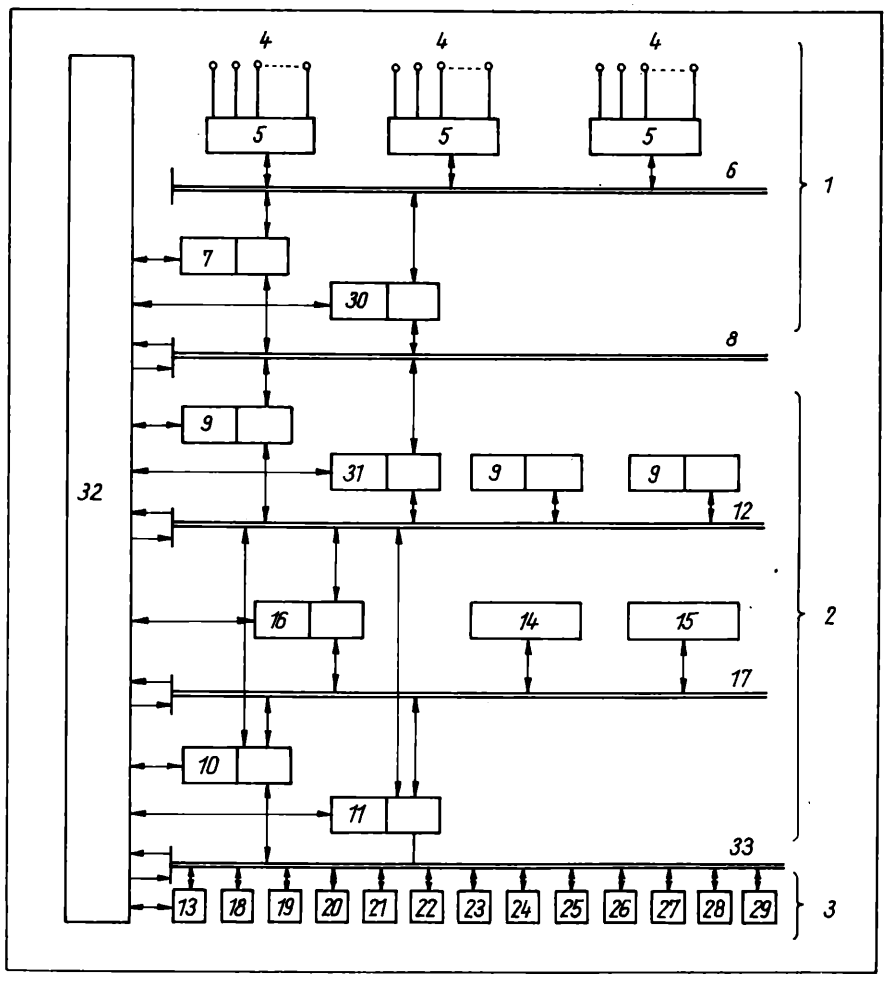
Die Erfindung besteht im wesentlichen darin, daß eine Vorrichtung zur Datentransformation in komplexen Prozeßsteuerungseinrichtungen geschaffen wird, die aus einem System zur primären Meßwertgewinnung *1* besteht, das entsprechend dem Umfang und der Funktionsgruppengliederung des technologischen Prozesses mehrfach vorhanden ist, dem Zentralsystem *2*, das mit Ausnahme des mehrfach vorhandenen Gruppenleitrechners für jede technologische Anlage einmal vorhanden ist und dem Informationskommunikationssystem *3*, das ebenfalls für eine technologische Anlage vorzugsweise einmal vorhanden ist.

Das System zur primären Meßwertgewinnung *1* besteht aus primären Meßwertgebern *4*, die gruppenweise an Analog-Digital-Umsetzer *5* angeschlossen sind. Diese sind über einer Busleitung *6* an einen Informationsgruppenrechner *7* angeschlossen. Über Gruppenbus *8* wird der Informationsgruppenrechner *7* weiterhin mit dem situationsabhängig arbeitenden Zentralsystem *2* gekoppelt.

Das Zentralsystem *2* besteht aus dem nach Prozeßabschnitten gegliederten, mit den Systemen zur primären Meßwertgewinnung *1* sowie mit weiteren an den Gruppenbus *8* anschließbaren Regelungs- und Steuerungsbaugruppen autonome prozeßsteuernde Strukturen bildenden Gruppenleitrechnern *9*, dem alle Gruppenleitrechner mit den zentralen Rechnern, Informationsrechner *10* und Operativrechner *11* verbindenden Zentralsystemeingangsbus *12*, dem Pultrechner *13*, den Ein- und Ausgabe-Baugruppen *14*, *15*, dem Zentralspeicher *16*, dem Zentralsystembus *17* und dem das Zentralsystem *2* mit dem Kommunikationssystem *3* verbindenden Zentralsystemausgangsbus *12*. Das Kommunikationssystem *3* besteht im einzelnen aus der Tastatur *18*, dem interaktiven Informationsbildschirmgerät *19*, dem interaktiven operativen Bildschirmgerät *20*, dem Situationspaneel *21*, dem Meldetableau *22*, der Anlagenschutz-Alarmeinrichtung *23*, der Regelungsalarmeinrichtung *24*, der Steuerungsalarmeinrichtung *25*, der Grenzwertalarmeinrichtung *26*, der Funktionstastatur *27*, der Situationsstörungsmeldung *28* sowie einer Wechselsprechanlage mit Sprachgenerator und Dialogtastatur *29*.
Einzelheiten gehen aus der umfangreichen Patentschrift hervor.

msr 7521

1 primäres Meßwertgewinnungssystem; 2 Zentralsystem; 3 Informationskommunikationssystem; 4 Meßwertgeber; 5 Analog-Digital-Umsetzer; 6 Busleitungen; 7 Informationsgruppenrechner; 8 Gruppenbus; 9 Gruppenleitrechner; 10 Informationsrechner; 11 Operativrechner; 12 Zentralsystemeingangsbus; 13 Pultrechner; 14, 15 Ein- und Ausgabebaugruppen; 16 Zentralspeicher; 17 Zentralsystembus; 18 Tastatur; 19 Informationsbildschirmgerät; 20 Bildschirmgerät; 21 Situationspaneel; 22 Meldetableau; 23 Anlagenschutz-Alarmeinrichtung; 24 Regelungsalarmeinrichtung; 25 Steuerungsalarmeinrichtung; 26 Grenzwertalarmeinrichtung; 27 Funktionstastatur; 28 Situationsstörungsmeldung; 29 Dialogtastatur; 30, 31 Bussteuereinheiten; 33 Zentralsystemausgangsbus



Automatisierungstechnik — Gegenwart und Zukunft. Band 200 der REIHE AUTOMATISIERUNGSTECHNIK. Von *H. Töpfer* und *W. Kriesel*. Berlin: VEB Verlag Technik 1982. 76 Seiten, 30 Bilder, 4 Tafeln, 4,80 Mark.
Bestell-Nr. 553 100 8

Als 1961 der erste Band der REIHE AUTOMATISIERUNGSTECHNIK erschien, war wohl weder seitens der Herausgeber noch der Benutzer vorauszusehen, welcher heute nicht mehr wegzudenkende Bestandteil der Fachliteratur damit ins Leben gerufen wurde. Die REIHE AUTOMATISIERUNGSTECHNIK hat international kaum Vergleichbares; sie ist für Automatisierungs-, Meß-, Steuerungs- und Rechentechniker zum Arbeitsmittel geworden, weil die Herausgeber und besonders der verlegerisch betreuende Lektor sorgfältig darauf geachtet haben, stets aktuell und andererseits komplettierend über Komponenten, Theorien, Algorithmen und Gerätesysteme sowie deren Bestandteile zu berichten. Zu diesem Erfolg haben sicher relativ kurze Herstellungszeiten und auch der günstige Preis beigetragen. Die „RA" ist den Bildungs-, Weiterbildungs- und Qualifizierungsvorhaben unentbehrlich und gehört zur Handbibliothek aller Fachkollegen.

In einem solchen Rahmen war es sicher reizvoll, im 200. Band auf die sich gegenwärtig vollziehenden Umwälzungen innerhalb der Automatisierungstechnik, aber auch die dadurch bewirkten Veränderungen in der Projektierungsphase und in den anwendenden Industriezweigen einzugehen.

Den beiden Autoren war es offensichtlich mehr als eine Pflichtübung, auf relativ knappem Raum den gegenwärtigen Stand übersichtlich darzustellen und davon ausgehend Prognosen zu wagen, die bis ins nächste Jahrzehnt tragfähig bleiben können. Zur Charakterisierung heutiger Automatisierungssysteme wird das System ursamat 5000 herangezogen, womit zugleich eine gute Gesamtübersicht über dieses System und die Verzahnung der Komponenten einschließlich der Softwaremodule gelingt. Daran schließen sich Beispiele für neuartige Automatisierungskonzepte an, die im Grunde erst durch mikrorechnergestützte Systeme realisierbar sind. Sie umfassen Automatisierungslösungen auf der Basisebene, auf dezentralen oder zentralen Koordinierungsebenen bis hin zur Prozeßoptimierung und -sicherung. Bemerkenswert ist die Eindringlichkeit, mit der die Autoren auf die Umstellung in der Projektierung hinweisen, die erforderlich ist, um den möglichen Qualitätssprung überhaupt durchführen zu können. Künftige Entwicklungsrichtungen und daraus zu erwartende Konsequenzen bilden den Abschluß des Textteils. Ein als Anhang beigefügtes Titelverzeichnis aller bisher erschienenen Bände der Reihe demonstriert kommentarlos die eingangs versuchte Wertung der REIHE AUTOMATISIERUNGSTECHNIK.

Der Band 200 ist damit nicht nur ein gelungener Jubiläumstitel, sondern auch und vor allem eine gute Übersicht über die Automatisierungstechnik von heute und die wahrscheinliche Technik von morgen. Eben wegen dieser gelungenen Übersicht und Tendenzaussage, für deren Verläßlichkeit der Name der Autoren steht, ist der Titel jedem Automatisierungstechniker, gleich welchen Alters und welcher Berufserfahrung, wärmstens zu empfehlen.

B 1585 *W. Richter*

Technische Diagnostik und technische Prophylaxe. Von *K. Heß*. Band 193 der REIHE AUTOMATISIERUNGSTECHNIK. Berlin: VEB Verlag Technik 1981. 80 Seiten, 48 Bilder, 4,80 Mark.
Bestell-Nr. 552 990 1

Die Broschüre behandelt nach einführenden Bemerkungen über Systemtechnik, Modellierung und Fehlerklassifikation auf etwa zwei Dritteln ihres Umfanges wesentliche Aspekte der technischen Diagnostik. Dabei wird von der notwendigen Zuordnung zwischen den durch Tests feststellbaren Symptomkomplexen und den im diagnostizierten System vorhandenen Fehlermustern ausgegangen. Die Denkansätze für Systemtestung, Testgrößengenerierung, Testoptimierung, Diagnosestrategien und Ausführung von Diagnostikprozeduren werden erläutert. Etwa 20 Seiten sind der technischen Prophylaxe gewidmet, vor allem der Fehlerprognostik. Darin werden „alle Maßnahmen zur Bestimmung des voraussichtlichen Verlaufs einer Fehlerentwicklung" eingeordnet. Die Prognostik wird unterteilt in Systemtestung, Symptombildung und Prognosestellung. Das Werk endet mit einigen Erläuterungen über materielle Hilfsmittel für Diagnostik und Prophylaxe, zur Bewertung von Diagnose- und Prophylaxe-Behandlungen, zur Datenerfassung, -rückmeldung und -auswertung, über diagnose- und prophylaxegerechte Systeme sowie zur Realisierung von Behandlungsprozeduren.

Mit der Schrift werden existierende fachgebietsbezogene Darstellungen zur Diagnose und Prophylaxe (z. B.:
H. Wohllebe. Technische Diagnostik im Maschinenbau. Berlin: VEB Verlag Technik 1978) im Sinne einer grundsätzlicheren systemtheoretischen Betrachtungsweise verallgemeinert. Die mathematischen Zusammenhänge werden meist nur in ihren Grundgedanken skizziert und nicht im einzelnen ausgeführt. Der Verfasser bemüht sich um eine weitgehende Klassifizierung und Systematisierung der Begriffe. Daher werden insbesondere Fachkollegen, die sich mit konkreten Anwendungen der Diagnose und Prophylaxe technischer Systeme befassen, diese leicht lesbare fachgebietsfreie Erläuterung der Zusammenhänge als nützliche Bereicherung der Fachliteratur begrüßen.

Die textliche und grafische Gestaltung des Buches lassen keine Wünsche offen.

B 1555 *K. Reinschke*

Kleines Lexikon der automatischen Steuerung. Von *H. Fuchs*. Band 194 der REIHE AUTOMATISIERUNGSTECHNIK. Berlin: VEB Verlag Technik 1981. 82 Seiten, 96 Bilder, 2 Tafeln, 4,80 Mark.
Bestell-Nr. 552 992 8

In der REIHE AUTOMATISIERUNGSTECHNIK sind schon mehrere Bände mit dem Titel „Kleines Lexikon der . . ." erschienen. Der Band 194 hatte im Band 40 bereits einen Vorläufer, dessen Inhalt und Titel jetzt der TGL 14591 (Ausgabe 1978) angepaßt wurde, wobei auch einige Begriffe aus der Mikrorechentechnik Berücksichtigung fanden.

Es ist verständlich, daß bei dem Umfang der Bände der Reihe nicht jedes Stichwort des Fachgebietes berücksichtigt werden kann.

Kritischer wirken sich aber gerade bei beschränktem Umfang Mängel im Aufbau aus. So ist die allgemeine lexikalische Definitionsregel: Stichwort (+ Synonym) = Definition + Erläuterung leider nicht eingehalten worden, Tautologien, nicht auffindbare Verweise und Unregelmäßigkeiten im Stichwortaufbau können den Benutzer mehr irritieren als Sicherheit verschaffen. Dafür drei Beispiele: Es gibt zwar nicht das Stichwort „Verknüpfungsglied", wohl aber ein „Elementares kombinatorisches Verknüpfungsglied" mit 53 Zeilen und einer Tafel; es gibt ein „Analoges Glied", umgekehrt aber ein „Glied, passives"; im Stichwort „Übertragungsglied" stehen auf 11 Zeilen 9 Verweise u. a. Wegen der erklärten Schnellebigkeit des Fachgebiets sollten auch Literaturzitate aus den sechziger Jahren besser entfallen.

Beim heutigen Angebot von Nachschlagewerken kann deshalb das „Kleine Lexikon" nicht voll befriedigen; der Anspruch im Vorwort, daß vor allem Lesern in der Aus- und Weiterbildung sowie nur gelegentlich mit dem Fachgebiet in Berührung kommenden Lesern eine Hilfe gegeben werden soll, wird wohl nur teilweise erfüllt. Ungeachtet dessen wird das Bändchen nicht zuletzt wegen der Preiswürdigkeit der Reihe seinen Leserkreis finden.

B 1570 *W. Richter*

Programmierbare Steuereinrichtungen. Von *W. Weller* und *H. Wilke*. Band 195 der REIHE AUTOMATISIERUNGSTECHNIK. Berlin: VEB Verlag Technik 1981. 68 Seiten, 45 Bilder, 2 Tafeln, 4,80 Mark.

Bestell-Nr. 552993 6

Für die Realisierung von Steuerungsfunktionen werden neben verdrahtungsprogrammierten Varianten zunehmend speicherprogrammierbare Systeme (SPS) eingesetzt. International wachsen die Anzahl der Hersteller und die Ausführungsvarianten sehr schnell. Ursprünglich waren sie für die Steuerung von Fertigungseinrichtungen entwickelt worden. Einfache Programmierung und unkomplizierte Verfahren beim Einsatz waren der Grund, weshalb sich programmierbare Steuereinrichtungen sehr schnell weite Anwendungsbereiche sichern konnten. Mit dem Einsatz von Mikroprozessoren als zentrale Verarbeitungseinheiten erweiterten sich erneut die Möglichkeiten ihrer Anwendung. Sie rücken damit in unmittelbare Nachbarschaft zu den Mikroprozeßrechnern.

Die Verfasser informierten mit diesem Band über die neue Generation von Gerätesystemen mehr umfassend und waren in der Darstellung, soweit möglich, um eine wissenschaftliche Fundierung bemüht. Die Abhandlung beschreibt die Merkmale, Eigenschaften und Strukturen programmierbarer Steuereinrichtungen und gibt Hinweise für die Programmierung und Projektierung. Neben detaillierten technischen Angaben, auch zu internationalen Ausführungsvarianten, wurden die verschiedenen Möglichkeiten einer formalisierten Problembeschreibung und ihre programmtechnische Umsetzung aufgezeigt. Im letzten Abschnitt werden die in der DDR verfügbaren programmierbaren Steuereinrichtungen PS 2000, ursalog 5010 und ursalog 5020 in Wort und Bild vorgestellt.

Den Verfassern ist es mit dem Band ausgezeichnet gelungen, fundierte Informationen über diese neue Technik kurz und bündig zu vermitteln und den Leser in die Besonderheiten der Anwendung einzuführen. Das Stoffgebiet ist klar gegliedert, die Darstellungen werden durch zahlreiche Zeichnungen und Fotos gut unterstützt. Die Abhandlung ist ebenfalls bestens als Material für die Weiterbildung und Qualifizierung geeignet.

B 1571 *W. Frützsch*

Schaltungstechnik mit Operationsverstärkern. 2., durchgesehene Auflage. Von *H. Mennenga*. Berlin: VEB Verlag Technik 1981. 156 Seiten, 96 Bilder, 5 Tafeln, 12,— Mark.

Bestell-Nr. 552727 9

Die moderne Elektronik ist gekennzeichnet durch den fortschreitenden Einsatz integrierter Halbleiterbauelemente. Zum dominierenden Bauelement im niederfrequenten analogen Bereich hat sich der Operationsverstärker entwickelt. Moderne, mit ausgefeilter Technologie hergestellte Bauelemente lassen sich bei ihrem Einsatz weitgehend als ideale Verstärker betrachten. Inwieweit dennoch die realen Parameter zu betrachten sind und wie bestimmte Schaltungsfunktionen realisiert werden, ist das Anliegen dieses Buches. Es wendet sich von der Konzeption her an diejenigen, die sich mit den grundsätzlichen Problemen des Operationsverstärkereinsatzes beschäftigen müssen, ist also als Lehrbuch anzusehen.

Nachdem im Einführungskapitel Aufbau und Eigenschaften der Operationsverstärker beschrieben wurden, beschäftigen sich die Hauptabschnitte mit der Anwendung. Es werden die Rückkopplungsschaltungen zur Anpassung des Universalbauelementes an den konkreten Einsatzfall und die Frequenzgangeinstellung zur Realisierung einer stabilen Arbeitsweise ausführlich betrachtet. Weitere Abschnitte ergänzen dies durch Ausführungen über auftretende Störgrößen und die notwendigen Gegenmaßnahmen sowie Hinweise zum Entwurf von Schaltungen.

Wesentliche Punkte jedes Abschnitts werden durch gut ausgewählte Beispiele vertieft. Ausführlichere Angaben zum Lösungsweg wären allerdings in einigen Fällen wünschenswert. Zu begrüßen ist die im Anhang enthaltene Einführung zu allgemeinen Problemen der Frequenzkennlinien.

Die Übersichtlichkeit der Ausführungen leidet teilweise unter der ungünstigen Zuordnung von Text und Abbildungen. Eine straffere Gliederung und die markante Herausstellung von grundsätzlichen Aussagen wäre ebenfalls zu wünschen.

Die bestehende Angebotslücke hinsichtlich eines übersichtlichen Nachschlagewerkes, das der Titel vermuten läßt, konnte, auch durch den begrenzten Umfang bedingt, nicht geschlossen werden. Dies bedürfte sicher auch einer Aktualisierung des Inhalts.

In der gewählten Form ist das Werk als gelungene Einführung in die Problematik einzuschätzen.

B 1563 *K. Fiedler*

Integration elektronischer Schaltungen und Mikrorechner. 3., stark bearbeitete Auflage. Von *A. Möschwitzer*. Berlin: VEB Verlag Technik 1981. 132 Seiten, 142 Bilder, 25 Tafeln, 11,— Mark.

Bestell-Nr. 552922 3

Alle Teilgebiete der Mikroelektronik — von der Technologie bis zur Applikation — zeichnen sich durch eine überdurchschnittliche Entwicklungsdynamik aus. Das Interesse an Kenntnissen und Fähigkeiten steigt entsprechend immer noch an. Daraus folgt, daß auch die Literatur umfassend sein muß, bei gleichzeitiger rascher Erneuerung ihres Inhaltes. Der Autor der Broschüre trägt dieser Forderung optimal Rechnung, indem die dritte Auflage vollständig neu bearbeitet wurde. Sie kann gegenüber den ersten zwei Auflagen als Fortschrittsbericht verstanden werden.

Die gegenwärtig aktuellen Halbleitertechnologien werden in der Broschüre in den entscheidenden Phasen von der Herstellung der Siliziumkristalle bis zum verkappten Schaltkreis sehr übersichtlich und durchsichtig beschrieben.

Schwerpunkte sind dabei die dominierenden Basistechnologien für Si-MIS- und Bipolartransistoren. Zusätzlich werden die passiven Elemente Widerstände und Kondensatoren auf Halbleitergrundlage beschrieben.

Der knappe Teil der Analogschaltkreise enthält die wichtigsten schaltungstechnischen Komponenten für integrierte Analogbauelemente. Leider wird der veraltete Operationsverstärker A 109 als Beispiel angeführt.

Der Teil der digitalen Schaltkreise beinhaltet technologisch bedingte Zellen, schaltungstechnisch realisierte kombinatorische und sequentielle Grundschaltungen sowie einfache Anwendungen von TTL-Schaltkreisen.

Obwohl ein größeres Kapitel zum Mikroprozessor Z 80 (CPU, PIO) enthalten ist, wird jedoch zur „Integration von Mikrorechnern" — wie es der Titel der Broschüre verspricht — leider doch nichts gesagt. Das ist sehr schade. Dagegen ist dieser Zusammenhang im letzten Teil, der sich mit Halbleiterspeichern beschäftigt, gut gelungen.

Die Begriffe: „Source Language", „Translation" und das häßliche Wort „Debugging" sind unnötig, da sie deutschsprachig als „Quellsprache", „Übersetzer" und „Fehlersuche" wesentlich besser bekannt sind.

Die Broschüre ist insgesamt sehr informativ, gut gestaltet und sehr effektiv zu verwerten.

B 1565 *M. Roth*

Noch mehr Spaß mit dem Taschenrechner Von *W. Gilde* und *S. Altrichter*. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1981. 191 Seiten, 23 Bilder und Illustrationen, 5,50 Mark.

„Dies ist ein Buch, das dem Rechnerbesitzer Spaß machen soll", betonen die Verfasser eingangs nachdrücklich, und sie schaffen dazu auch die notwendigen Voraussetzungen. Dem Leser werden in zwangloser Folge Aufgaben aus den verschiedensten Wissensgebieten vorgestellt und vorgerechnet. Der Themenkreis ist erstaunlich weit gespannt und schließt Gebiete wie Astronomie, Archäologie, Umweltschutz, Trigonometrie, Zahlentheorie sowie Sport und Spiel ein. Dem beabsichtigten Zweck des Buches kommt zugute, daß man mit jedem beliebigen

Abschnitt beginnen kann und sich nicht mühsam zu ihm vorarbeiten muß. Die Rechengänge sind im allgemeinen durchsichtig angelegt und leicht nachvollziehbar. Durch das notwendigerweise Fragmentarische der einzelnen Problemstellungen bleiben andererseits genügend viele Fragen offen, um zu weiterführenden Überlegungen anzuregen. Vielleicht wird sogar bisweilen dem Durchschnittsleser zuviel zugemutet. Als Beispiel sei die pauschale Aussage: „Unsere Uhren drehen sich gleichmäßiger als die Erde" (S. 77) angeführt, die unter Umständen falsche Vorstellungen von der Himmelsmechanik vermittelt. Literaturverweise im Text und ein reichhaltigeres Literaturverzeichnis würden dem Leser die Klärung auftretender Fragen erleichtern. Diese unbedeutenden Unzulänglichkeiten werden jedoch dem Vergnügen, das dieses Buch zweifellos allen bereiten wird, die gern knobeln und rechnen, kaum Abbruch tun.

B 1587 *E. Suschke*

Logische Grundlagen der Versuchsplanung. Von *V. V. Nalimov* und *T. I. Golikova* (in Russ.). Moskau: Metallurgija 1981. 152 Seiten, 28 Tafeln, 1 Bild.

Zur Zeit gibt es ausreichende Erfahrungen bei der Anwendung der Versuchsplanung in verschiedenen Tätigkeitsbereichen und Wissenschaftsdisziplinen. Mehrere Tausend Publikationen behandeln Probleme der Anwendung und theoretischen Weiterentwicklung. Ungeachtet dessen sind die theoretischen Grundlagen der Versuchsplanung entsprechend der Auffassung der Autoren noch unzureichend entwickelt. In den Lehrbüchern zur Versuchsplanung werden verschiedenartige Prinzipien erläutert, unterschiedliche Pläne für ausgewählte konkrete Situationen angeboten sowie spezielle mathematische Probleme bei der Entwicklung optimaler Pläne untersucht. Vermißt wird in diesen Publikationen eine „Ideologie" der Versuchsplanung.

Dementsprechend stellen sich die Autoren mit ihrem Buch, das sie nicht nur für Vertreter der mathematischen Statistik, sondern vor allem für den umfangreichen Anwenderkreis geschrieben haben, die Aufgabe, die logischen Voraussetzungen, auf denen die Versuchsplanung aufbaut, herauszuarbeiten. Sie verzichten dabei bewußt auf Aspekte der praktischen Anwendung, die in der Literatur gut nachlesbar sind.

Im ersten Kapitel wird, ausgehend von verschiedenen Definitionen, für den Begriff „Experiment" dargelegt, was die Autoren unter einem guten (im statistischen Sinne) Experiment verstehen. Die gegebenen Beispiele belegen die Notwendigkeit aktiver, orthogonaler, randomisierter Mehrfaktorexperimente. Entsprechend den vielfältigen Anforderungen an die Modellgüte ergeben sich unterschiedliche Optimalitätskriterien und entsprechende Versuchspläne, die im 2. Kapitel ausführlich behandelt sind und im 3. Kapitel zur Schätzung polynominaler Modelle angewendet werden. Von größerem Interesse dürfte das 4. Kapitel sein, in dem die optimale Versuchsplanung für diskrete Variable untersucht wird.

Neben diesen statischen Kriterien entwickeln die Autoren dynamische Kriterien, die der Auswahl einer optimalen Strategie in einer aufeinanderfolgenden Serie von Versuchen dienen. Ausführlich behandelt werden Optimalkriterien für die Experimente zur Auswahl wesentlicher Faktoren (zufällige Bilanz) und für die Auswahl bester Modelle (Diskriminanzanalyse). Abschließend gehen die Autoren auf rechentechnische Schwierigkeiten bei nichtlinearen Modellen ein.

B 1544 *J. Peters*

Control and Dynamic Systems. Advances in Theory and Applications. Von *C. T. Leondes* (ed.) (in Russ.). Moskau: Mir 1980. 408 Seiten, 58 Bilder, 9 Tafeln.

Diese Kollektivarbeit führender amerikanischer Wissenschaftler zu neuesten Ergebnissen auf dem Gebiet der modernen Steuerungstheorie ordnet sich ein in die Thematik „Filterung und stochastische Steuerung in dynamischen Systemen" (Titel der sowjetischen Ausgabe). Dabei gelingt es den Autoren, neben einem guten Überblick über die wichtigsten Entwicklungseinrichtungen und über den erreichten Stand sowie einer ausreichend detaillierten Behandlung ausgewählter neuester Ergebnisse insbesondere auch die Anwendungsprobleme bei der Lösung entsprechend komplizierter Aufgabenstellungen und Ergebnisse in realen Situationen darzulegen.

Nach einem Überblick über Methoden der Filterung und stochastischen Steuerung in dynamischen Systemen (*H. W. Sorenson*) werden lineare und nichtlineare Filtermethoden (*G. T. Schmidt*) behandelt. *Y. Bar-Shalom* und *E. Tse* legen Konzeptionen und Methoden der Steuerung dynamischer stochastischer Systeme dar. Dabei begründen sie insbesondere den für die Steuerung stochastischer Systeme entscheidenden Unterschied zwischen „feedback control" und „closed loop control", der in der Verwendung von Information über die Zukunft besteht.

Weitere Beiträge sind der Identifikation (*W. C. Martin, A. R. Stubberud*), diskreten stochastischen Beobachtern (*L. M. Novak*) sowie der adaptiven Schätzung in diskreten linearen Systemen (*R. F. Chap*) gewidmet. Die in dem Buch enthaltenen neuen Algorithmen zur Lösung der Aufgabe der optimalen Filterung (*L. M. Silverman*) ermöglichen die Effektivität der entwickelten Filtermethoden erheblich zu verbessern und gleichzeitig den rechentechnischen Aufwand zu senken. Weitere Beiträge sind der Synthese von Regelungssystemen bei Rauschen gewidmet, wobei das Rauschen durch eine Reihenentwicklung approximiert wird (*C. D. Johnson*) sowie der Kalmanschen Filtertheorie (*H. W. Brewer*).

B 1544a *J.-A. Müller*

Automatisierung der Produktionsprozesse in der Schwarzmetallurgie. Von *N. I. Ivanov, B. N. Parsunkin* und *V. M. Rjabkov* (in Russ.). Moskau: Metallurgija 1980. 304 Seiten, 16 Tafeln, 121 Bilder.

Neben allgemeingültigen Methoden sind bei der Automatisierung der Produktionsprozesse prozeßspezifische Kenntnisse und Gesichtspunkte zu beachten. Das Autorenkollektiv hat mit dem Buch, das vom sowjetischen Hochschulministerium als Lehrbuch für Studenten metallurgischer Fachrichtungen bestätigt wurde, ein Material geschaffen, in dem neben Grundkenntnissen der Theorie der automatischen Regelung eine Methodik zur Untersuchung von Objekten der Metallurgie entwickelt wird. Im Verlauf des Studiums dieses Buches wird der Leser mit der grundlegenden Terminologie und den erforderlichen Grundlagenkenntnissen der Kybernetik, mit mathematischen Beschreibungsverfahren für Produktionsprozesse, der technischen Diagnostik sowie der Ermittlung statischer und dynamischer Kenngrößen von metallurgischen Objekten vertraut gemacht. Auf der Grundlage der Regelungstheorie und mathematischen Optimierung erhält er elementare Vorstellungen über die Analyse des tatsächlichen Zustands des Produktionsprozesses, die Auswahl von Steuerkriterien, die Ermittlung der Struktur des Steuerungsobjekts und die optimale Steuerung.

An der Ausarbeitung des Lehrbuches nahmen erfahrene Wissenschaftler verschiedener Hochschuleinrichtungen und Forschungsinstitute teil, die auf der Grundlage der praktischen Erfahrung der Automatisierung in der Metallurgie zur entsprechenden Verallgemeinerung in der Lage waren. Vorausgesetzt werden technologische Kenntnisse aus der Metallurgie. Dabei behandeln die Autoren nur den unmittelbaren technologischen Prozeß, Probleme z. B. der Automatisierung der Produktionsvorbereitung und Produktionsdurchführung (Produktionslenkung) werden nicht explizit dargelegt.

B 1543 *K.-H. Winter*

Nichtlineare Regelungen II. Anwendung der Zustandsebene — Ljapunow-Theorie — Popow- und Kreiskriterium. 3. überarbeitete und erweiterte Aufl. Von *O. Föllinger*. München/Wien: R. Oldenbourg Verlag 1980. 332 Seiten, 175 Bilder.

Zwei Vorbemerkungen sind angebracht: 1. Der Rezension liegt zwar die 3. Auflage des Oldenbourg-Verlages zugrunde, Band II ist aber nun auch — wie bereits Band I — in einer Ausgabe des Akademie-Verlages verfügbar.

2. Nach der ursprünglichen Konzeption waren die Nichtlinearen Regelungen auf 3 Bände verteilt. Der vorliegende Band II enthält in einer erweiterten Auflage die beiden alten Bände II und III, also sowohl „Anwendung der Zustandsebene" als auch „Ljapunov-Theorie und Popov-Kriterium".

Mit der „Zustandsebene" sind Systeme 2. Ordnung erfaßbar, wenn man voraussetzt, daß die Eingangsgröße stückweise konstant ist (Relaischarakteristik).

Unter anderem werden Regelkreise mit Strukturumschaltung der Reglerfunktion behandelt. Die Zustandsebene wird weiter zum Entwurf zeitoptimaler und suboptimaler Regelungen angewendet. Auch Systeme höherer Ordnung sind der Behandlung durch verschiedene Approximationsansätze zugänglich. Dies wird am Beispiel der zeitoptimalen Walzenanstellung eines Walzengerüstes ausführlich verdeutlicht.

Die Ljapunow-Theorie ist eine umfassende Methode zur Bestimmung des Einzugsbereiches einer asymptomatisch stabilen Ruhelage. So einfach, wie der gedankliche Ansatz zu verstehen ist, so schwierig ist die Konstruktion von Ljapunow-Funktionen, die in direkter Weise, d. h. ohne Lösung der Zustandsdifferentialgleichungen, eine Stabilitätsaussage liefern. Auch hier wird der interessante Entwurf strukturumschaltender Systeme, nun durch Ljapunow-Funktionen, gezeigt. Verbesserung des dynamischen Verhaltens und Rechenzeiteinsparung in Mikrorechnern sind Vorteile, die dieser Theorie auch das Interesse der Praktiker sichern sollten. Das Popow-Kriterium ist eine sehr praktikable Methode, vergleichbar dem Nyquist-Kriterium zur Stabilitätsuntersuchung linearer Regelkreise, läßt sich also mit Hilfe einer Ortskurve im Frequenzbereich formulieren.

Vier Methoden sind in Band I und II zur Untersuchung nichtlinearer Systeme vorgestellt worden.

Keine ist so universell, daß sie die anderen ersetzen könnte. Man muß sich damit abfinden, daß das nichtlineare Problem verschiedene Betrachtungsstandpunkte erfordert. Wenn man dabei so didaktisch vorzüglich an die Hand genommen wird, wie von *O. Föllinger*, und dabei zur Lösung praktisch relevanter Probleme befähigt wird, dann kann man beiden Bänden nur eine weite Verbreitung wünschen.

B 1564 *B. Rodenbeck*

Microprocessor and Digital Computer Technology. Von *J. E. Oleksy* und *G. B. Rutkowski*. London: Prentice-Hall. International Inc. 1981. 419 Seiten, 368 Bilder.

Dieses Buch ist eine einfache Einführung in die grundlegenden Hard- und Softwareprobleme der Mikrocomputertechnik. Dabei wird vor allem von den vordergründigen ingenieurtechnischen Realisierungsgesichtspunkten von digitalen Computerschaltungen mit verfügbaren integrierten Schaltkreisen ausgegangen. Nach den üblichen einleitenden Kapiteln über Zahlen, Kodes, Programmiertechnik und grundlegende Bauelemente und Logikgates erfolgt eine Funktionsbeschreibung und Darstellung der prinzipiellen Anwendungen der wichtigsten Computerkomponenten wie Zähler, Register, Dekoder/Enkoder, Multiplexer, Arithmetikeinheiten, Taktgeneratoren, Speicher und Mikroprozessorschaltkreise. Hierbei stehen besonders industriell verfügbare TTL- und MOS-Schaltkreise im Vordergrund.

In einem weiteren Teil des Buches werden die Computerarchitektur, die Eingabe und Ausgabegeräte, die Datenformate und Programmierungssprachen behandelt. Besonders bemerkenswert an diesem Teil ist, daß der Stoff am praktischen Entwurf eines kleinen Computers mit SSI- und MSI-Schaltkreisen demonstriert wird.

Die Darstellung der Materie erfolgt ohne mathematische und tiefergehende theoretische Betrachtung direkt zugeschnitten auf die praktischen Belange der Realisierung von digitalen Computerschaltungen. Das erworbene Wissen ist sofort anwendungsbereit. Spezielle Vorkenntnisse sind für die Lektüre nicht erforderlich.

Dieses Buch wird einen breiten Leserkreis unter Ingenieuren zahlreicher Fachrichtungen, vom Computerhardwaredesigner bis zum Mikroprozessoranwender in verschiedenen Industriezweigen, finden.

B 1512 *A. Möschwitzer*

Entwurf von Betriebssystemen. Eine Einführung. Von *A. N. Habermann*. (Übers. a. d. Engl.). Westberlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1981. 453 Seiten, 87 Bilder.

Betriebssysteme zählen zu den größten und kompliziertesten Programmen, sie werden in der Regel vom Rechnerproduzenten mit den Rechnern bereitgestellt. Einführende Literatur in die Arbeitsprinzipien, Konstruktion und Entwicklung von Betriebssystemen ist im Deutschen rar.

Das 1976 in den USA erschienene und nun in deutscher Übersetzung vorliegende Buch von *A. N. Habermann* „Einführung in den Betriebssystementwurf" behandelt die Steuerprogramme von Betriebssystemen aus der Sicht des Systementwicklers. Es enthält die wichtigsten Themen, die für ein vertieftes Verständnis der Arbeitsweise dieser Steuerprogramme erforderlich sind und gibt zugleich eine Einführung in Probleme des Betriebssystementwurfs. Die Darstellung ist mehr konstruktiv als deskriptiv und nicht — wie die meisten anderen Veröffentlichungen zu Betriebssystemen — auf einen bestimmten Rechnertyp orientiert.

Das Buch ist gegliedert in die Kapitel: Einführung, Grundlegende Konzepte von Betriebssystemen, Nebenläufige Prozesse, Kooperierende Prozesse, Kommunizierende Prozesse, Ablaufsteuerung, Speicherverwaltung, Strategien zur Speicherverwaltung, Datenverwaltung, Systemstruktur und -entwicklung. Abschnittsweise werden Übungsaufgaben gestellt (insgesamt etwa 100), die eine aktive Stofferarbeitung ermöglichen. Die Lösungen enthält der Text jedoch nicht. *A. N. Habermann* verwendet als Entwurfsmittel für die über 100 Programmbeispiele im Text keine Systemprogrammiersprache, sondern einen speziell von ihm eingeführten Pseudokode, der sich an höhere Programmiersprachen anlehnt. Die Auswahl des Stoffes und seine Darstellung belegen die solide Fachkenntnis und das didaktische Geschick des Autors. Nach seinen Angaben im Vorwort wurde das Originalmanuskript rechnergestützt erarbeitet. An der Korrektur wirkten auch Studenten mit.

Die Übersetzung ins Deutsche ist sorgfältig ausgeführt. Programme und Formeln enthalten jedoch vereinzelt kleinere Druckfehler.

Das Buch spiegelt leider nur den Wissensstand bis zum Jahre 1975 wider. Auch die vielen Literaturhinweise wurden nicht auf neuen Stand gebracht. Dennoch ist dieses Buch für interessierte Leser mit Programmerfahrung eine nützliche und anspruchsvolle Einführung in das komplizierte und interessante Gebiet der Steuerprogramme von Betriebssystemen und ihren Entwurf. Der zur Mitarbeit bereite Leser wird es nicht ohne Gewinn aus der Hand legen.

B 1518 *G. Saeltzer*

Digital circuits and microcomputers. Von *D. E. Johnson, J. L. Hilburn* und *P. M. Julich*. London: Prentice-Hall International, Inc. 291 Seiten, zahlr. Bilder und Tafeln.

Insbesondere mit der Einführung integrierter mikroelektronischer Schaltkreise hat die Digitaltechnik innerhalb der Elektronik einen enormen Aufschwung genommen. Sie hat nicht nur viele elektronische Gerätetechniken revolutioniert, sondern auch in zahlreichen Gebieten der Technik neue Lösungen ermöglicht. Schließlich führte die Herstellung von digitalen Bausteinen, die einen kompletten Mikrocomputer enthalten, zu einer weiteren, höheren Stufe dieser Entwicklung. Nicht nur in elektronischen Fachrichtungen werden deshalb heute die Grundlagen der Digitaltechnik

und der Mikrocomputer gelehrt. Das vorliegende Lehrbuch umfaßt einen elementaren Einführungskurs in die Digital- und Mikrocomputertechnik im Umfang eines Semesters. Es sind außer den üblichen „Oberschulkenntnissen" in Mathematik keinerlei weitere Voraussetzungen zum Studium dieses Buches erforderlich. Der Inhalt ist in der für solche Bücher üblichen Art gegliedert: 1) Grundlagen der Digitaltechnik (Zahlensysteme, Schaltalgebra, Kodes, Arithmetik); 2) Digitale Schaltungstechnik (Logikgatter, Flip-Flops, Logiknetze, Zähler und Register) und schließlich 3) Hard- und Software von Mikrocomputern (stark vereinfacht!). Die Darstellung des Stoffes erfolgt in einer sehr klaren Sprache und anhand übersichtlicher, einprägsamer Bilder und ist pädagogisch gut durchdacht. Lediglich die Abschnitte über Kodes und Arithmetik, die zwischen Schaltungskapiteln angeordnet sind, hätten besser bei den Grundlagen am Anfang Platz gefunden.

Besonders bemerkenswert an diesem Buch ist auch, daß bestimmte ergänzende Schaltungsbeispiele und Zusammenhänge in Übungsabschnitten (exercises) und Aufgaben (problems) selbst vom Leser erarbeitet werden. Hierzu zählen beispielsweise spezielle Zähler, Register, Logiknetzwerke, Kodewandler und Multiplexer. Durch diese Methode wird zweierlei gleichzeitig erreicht: Erstens wird erworbenes Wissen erprobt und vertieft, und zweitens wird inhaltliche Substanz hinzugefügt durch Mitarbeit des Lesers, so daß sich dazu längere Erläuterungen erübrigen. Deshalb war es auch möglich, alles auf weniger als 300 Seiten unterzubringen.

B 1519 *A. Möschwitzer*

Ionenimplantation in der Halbleitertechnik. Von *G. Carter* und *W. A. Grant*. Die deutsche Ausgabe besorgten *H. G. Wagemann*, *W. Fahrner* und *G. Ruprecht*. München/Wien: Carl Hanser Verlag 1981. 265 Seiten, 117 Bilder.

Die Ionenimplantation ist heute einer der wichtigsten technologischen Teilprozesse bei der Fertigung von integrierten Schaltkreisen und Halbleiterbauelementen. Der besondere Vorteil dieses Verfahrens besteht in der genauen Dosierbarkeit (bis zu kleinsten Störstellenkonzentrationen), der Möglichkeit der Prozeßführung bei niedrigen Temperaturen und der Erzielbarkeit von Mikrostrukturen. Im Buch werden physikalische und technische Aspekte dieser Technik behandelt, wobei der Inhalt im wesentlichen in 2 Hauptteile eingeteilt werden kann: Der erste Teil, der den größten Teil des Umfanges ausmacht, ist der Physik der Ionenimplantation gewidmet. Hier wird mit einfachen Modellen die Stoßkinematik zwischen Atomen, die Problematik des Eindringens der Ionen in einen Festkörper (Reichweite, Störstellenprofile, Channelling) sowie die Erzeugung und Messung von Strahlenschäden behandelt. Die Ergebnisse der einfachen analytischen Modellrechnungen werden durch Ergebnisse der Computersimulation gestützt und an einigen Stellen auch mit Meßergebnissen verglichen.

Der zweite Teil des Buches beschäftigt sich mit Anwendungen der Ionenimplantation, vorzugsweise bei der Fertigung von Halbleiterbauelementen, wie Widerstände, MOS-Feldeffekttransistoren, *pn*-Übergänge, Schottkydioden, Varaktordioden, CCD-Elemente, preiswerte Solarzellen und GaAs-MESFET-Mikrowellentransistoren. In diesem Teil erfolgen auch eine Beschreibung des Aufbaues eines Ionenimplanters sowie Angaben über die praktische Durchführung der Ionenimplantation (Vorbereitung und Nachbehandlung der Proben, Vorbereitung des Implanters, Sicherheitsfragen). Dieses Buch ist sowohl für experimentell als auch theoretisch interessierte Leser sehr nützlich.

B 1531 *A. Möschwitzer*

Messen, Steuern, Regeln in der Chemischen Technik. 3., neubearbeitete Aufl. Band III: Meßwertverarbeitung zur Prozeßführung I (Analoge und binäre Verfahren). Herausgeber *J. Hengstenberg*, *B. Sturm* und *O. Winkler*. Westberlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1981. 500 Seiten, 451 Abbildungen in 515 Teilbildern.

Aus der auf fünf Bände konzipierten, neubearbeiteten dritten Auflage dieses Standardwerkes liegt jetzt auch der III. Band vor; über den I. und II. Band wurde in der msr (Hefte 2/1981 und 7/1981) bereits referiert. Dieser dritte Band befaßt sich zum überwiegenden Teil mit den heute oft etwas leichtfertig als „konventionell" umschriebenen analogen Verfahren und Einrichtungen der Prozeßführung und in einem letzten (8.) Abschnitt mit binären Steuerungen. Berücksichtigt man die wohl größte Zielgruppe des Benutzerkreises, nämlich Benutzer von Meß- und Regelgeräten in der chemischen Industrie, so ist der gewählte Aufbau des Buches, die Darstellungsart und auch die Stoffauswahl ein aus der Sicht des Rezensenten gelungener Kompromiß zwischen notwendigem theoretischem Rüstzeug, gegenwärtigem technischem Stand sowie praktischen Erfahrungswerten bzw. Anwendbarkeitskriterien. Die Autoren unterliegen nicht der spekulativen Versuchung einer Trendeinschätzung, sondern teilen Erfahrungen für Standardlösungen mit, ohne Sonderentwicklungen überzubewerten (Beispiel: Stelltechnik). Im einzelnen befassen sich die ersten sieben Abschnitte mit: Grundbegriffen, der Regeleinrichtung, Stellgliedern, der Regelstrecke, dem Regelkreis, Mehrgrößenregelungen und der Regelung von Anlagen. Dieser 7. Abschnitt verdient hervorgehoben zu werden, weil darin die Anwendererfahrung konzentriert ist. In der zweiten Auflage waren die Anwendungsbeispiele Destillation, Sprühtrocknung, Wirbelschichtrösten, Luftzerlegung und Chargenprozesse, während in der dritten Auflage Großmaschinen ($>$ 1 MW Leistung), Produktverteilung, Wärmetauscher, Destillationskolonnen und Reaktoren (Wirbelschicht- und Rohrreaktoren) behandelt werden. Die mögliche Verzahnung analoger und digitaler Verfahren wird der Gesamtkonzeption gemäß nur angedeutet (und im IV. Band sicher ausführlich vorgenommen). Der abschließende 8. Abschnitt über elektrische (elektronische) und pneumatische Steuerungen läßt sich damit auch als Bindeglied zum Rechnereinsatz auffassen.

Auch der III. Band festigt den Ruf des Gesamtvorhabens als Standardwerk.

B 1536 *W. Richter*

Realization Theory of Continuous-Time Dynamical Systems. Von *T. Matsuo*. Westberlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1981. 329 Seiten.

In der Monographie werden die mathematischen Grundlagen der Realisierungstheorie dynamischer Systeme dargestellt. In Anlehnung an *R. E. Kalman* versteht der Autor unter einem dynamischen System ein Tripel, bestehend aus einem Zustandsraum, einem Eingangsmechanismus und einem Ausgangsmechanismus.

Nach einer kurzen Einführung wird im Kapitel B (97 S.) eine Realisierungstheorie allgemeiner dynamischer Systeme entwickelt. Das zu lösende Realisierungsproblem lautet: gegeben ist die Eingangs/Ausgangs-Relation einer als kausal vorausgesetzten Black Box mit Eingangs- und Ausgangsklemmen. Gesucht ist ein (bis auf Isomorphien eindeutiges) kanonisches dynamisches System, das die gleiche Eingangs/Ausgangs-Relation hat wie die Black Box. Durch Erweiterungen von Denkansätzen und unter Verwendung des algebraischen Apparates der abstrakten Automatentheorie gelingt die vollständige Lösung des Problems. Dabei ist das vom Verfasser eingeführte Konzept der abstrakten Verkettungsmonoide (concatenation monoids) wesentlich. In den Kapiteln C und D (97 S. und 134 S.) werden Realisierungstheorien für wichtige Klassen dynamischer Systeme, nämlich für die Klasse der linearen Darstellungssysteme einerseits und für die Klasse der (algebraischen) linearen zeitkonstanten Systeme andererseits, vorgelegt.

Das Buch liefert einen wesentlichen Beitrag zur Weiterentwicklung der abstrakten Systemtheorie. Anwendungen werden nicht behandelt. Das Studium des Werkes setzt eine sehr tiefgehende mathematische Vorbildung des Lesers voraus.

B 1557 *K. Reinschk*

Lehrgang „ARS-Technologie Algorithmenprojektierung"

Die Sektion Informationsverarbeitung der TU Dresden veranstaltet vom 29. September bis 1. Oktober 1982 diesen Lehrgang zu folgenden inhaltlichen Schwerpunkten:

- Softwaretechnologie
- Verbesserung von Qualität und Produktivität bei der Softwareproduktion
- Allgemeine und rekursive Strukturierung beim Softwareentwurf
- Synchronisations- und Koordinationsstrukturen
- Entwurfsmethoden
- Realisierungsmethoden und -mittel
- Beispielentwürfe
- Qualitative und quantitative Bewertung.

Voraussetzungen für die Teilnahme sind Hoch- oder Fachschulabschluß in einer technischen, ökonomischen oder naturwissenschaftlichen Fachrichtung sowie Grundkenntnisse und Erfahrungen in der Softwareprojektierung, möglichst Tätigkeit in einer Projektleitung.

Bewerbungen sind unter Angabe der erfüllten Voraussetzungen bis 16. August 1982 zu richten an:

Technische Universität Dresden, Sektion 08, Dr. *Engelien*, 8027 Dresden, Mommsenstraße 13.
Quartier kann leider nicht zur Verfügung gestellt werden.

3. Fachtagung „Applikation Mikroelektronik — Stand und Tendenzen"

Am 9. und 10. Dezember 1982 veranstaltet der Fachverband Elektrotechnik der KDT in Verbindung mit dem Kombinat Mikroelektronik mit internationaler Beteiligung in Leipzig, Brühlzentrum, die o. g. Tagung zu folgenden inhaltlichen Schwerpunkten:

- Methodologie der Einführung und Anwendung der Mikroelektronik – Erfahrungen aus der Einsatzvorbereitung
- Anwendung der Mikroelektronik zur Rationalisierung und Automatisierung industrieller Prozesse
- mikroelektronische Lösungen zur Prozeßdatenaufbereitung und Prozeßführung
- Erfahrungen aus der Anwendung der Mikroelektronik in nichtindustriellen Bereichen und Zweigen.

Organisatorische Auskünfte erteilt das KDT-Präsidium, Fachverband Elektrotechnik, 1086 Berlin, Clara-Zetkin-Str. 115/117, Telefon 2202531, App. 216.

Problemseminar „Einsatz von Mikrorechnern in der Chemieindustrie"

Das Organisations- und Rechenzentrum der TH „Carl Schorlemmer" Leuna-Merseburg führt am 18. November 1982 im Rahmen seiner „Rechentechnischen Kolloquien" das o. g. Problemseminar durch.

Die Veranstaltung verfolgt das Ziel, den aktuellen Stand und die Entwicklungstendenzen des Einsatzes von Mikrorechnern im Bereich der chemischen Industrie aufzuzeigen und den Erfahrungsaustausch beim Einsatz von Mikrorechnern zu unterstützen.

Anforderungen der Themen- und Zeitpläne sowie Teilnahmemeldungen sind bis zum 29. Oktober 1982 an das ORZ der TH „Carl Schorlemmer" Leuna-Merseburg (Telefon 462920) zu richten.

Ausbildung zum Meister der BMSR-Technik

Im VEB GRW Teltow beginnt im September 1982 ein Internatslehrgang zur Ausbildung von Meistern der BMSR-Technik, für den noch einige Studienplätze frei sind. Der Lehrgang wird über 2 Jahre bei jeweils 1 Woche Direktstudium im Monat (Unterbringung im Arbeiterwohnheim) geführt.

Nähere Auskünfte erteilt die Ausbildungsstätte, die Betriebsschule „Georg Schumann" des VEB GRW Teltow, 1530 Teltow, Oderstraße 74–76.

Elektronischer Gärtner

Die Gewächshausaufzucht von Tomaten, Gurken, Chrysanthemen u. a. Pflanzen erfordert geeignete Temperaturen, Boden- und Luftfeuchte, entsprechenden Kohlendioxydgehalt der Luft und auf die Pflanzen abgestimmte Düngung. Für die Aufrechterhaltung optimaler Zustände dieser Größen ergeben sich eine ganze Reihe von miteinander zu koordinierenden Regelungsaufgaben. Daher schuf das Beratungs- und Informationszentrum Mikroelektronik des Bezirkes Erfurt ein Computerprogramm, das im Gewächshaus des VEB Saatzucht Zierpflanzen Mittelhausen einen Mikroprozessor, der mit 96000 Informationen versorgt ist, steuert. Damit werden optimale Wachstumsbedingungen geschaffen, indem ständig Innen- und Außentemperaturen, Lichteinstrahlung und Wuchsstärke erfaßt werden und dann sofort Heizung, Lüftung, Sprühkühlung und Schattierung nachgeregelt werden. Außerdem sind Havariemeldungen durch den Rechner (Sturm, Versagen der Heizung, Computersystemfehler) vorgesehen. (ADN BWT (18) 1489, 6a)

Mikroelektronik für Äthylamin-Anlage

Eine neue Äthylamin-Anlage, deren Überwachungs- und Analysenfunktion von einem Mikrorechner des Typs K 1510 übernommen wird, wurde im VEB Leuna-Werke entwickelt. Zur Qualitätssicherung der Äthylamine werden die Werte alle 20 min ausgegeben. Für die neue Anlage werden Teile der alten weitergenutzt, und es zeigte sich, daß die Mikroelektronik auch in älteren bzw. rekonstruierten Chemieanlagen einen hohen Nutzen bringt, denn Produktion und Arbeitsproduktivität erhöhten sich um das Fünffache. Äthylamin ist ein Zwischenprodukt zur Herstellung von Autolacken und PKW-Reifen und wird zur Produktion von Pharmazeutika verwendet. (ADN-BWT (18) 1460)

Mikroprozessorgesteuerte Filmkamera

Von der österreichischen VOEST Alpine AG, Werk Ferlach, wurde eine 35-mm-Kamera mit Mikroprozessorsteuerung entwickelt. Mit Hilfe eines besonders leise arbeitenden Laufwerkes ist das Filmen mit Originaltonaufnahmen möglich. Außerdem ist die „Moviecam 3*n*-2" mit einer integrierten Videokamera für Kontrollfunktionen, mit einem frei programmierbaren Steuergerät für Zeitlupen- und Zeitrafferaufnahmen sowie mit einem automatischen System der Szenennumerierung ausgestattet. (ADN BWT (18) 1480, 3c)

Leiterplattenprüfautomat

Zur automatischen Prüfung von Leiterplattenbaugruppen wurde im Institut für Nachrichtentechnik Berlin der Prüfautomat EPG 76 entwickelt. Über ein programmierbares Relaisschaltfeld und eine elektronische Koppelpunkteinheit wird der Prüfling mit den internen und externen Generatoren und Meßgeräten verbunden. Der Prüfablauf wird von einem KRS 4201 gesteuert. Die Fehlerortung erfolgt rechnergestützt.

(ADN BWT (18) 1481, 3a)

KURZFASSUNGEN

Früchtel, G.: IA 5.6.3.

Einsatz lernfähiger Steuerungsstrukturen zur effektiveren Nutzung statischer Prozeßoptimierungsalgorithmen für die On-line-Prozeßsteuerung

msr **25** (1982) H. 6, S. 302–306

Bei der On-line-Prozeßsteuerung verfahrenstechnischer Prozesse können statische Prozeßoptimierungsalgorithmen dann nicht effektiv angewendet werden, wenn schnelle Steuereingriffe erfolgen müssen, die Optimierungsberechnungen aber langwierig sind. Es wird die Kopplung der statischen Optimierung mit lernfähigen Elementen vorgeschlagen, die ein approximiertes Steuergesetz erarbeiten, das bis zur Bereitstellung der optimalen Lösung schnelle, suboptimale Steuerreaktionen ermöglicht.

Küßner, K.; Martin, K.: IA 2.3.1.0.

Übersicht über numerische Verfahren zum Entwurf von optimalen Regelungen im Zustandsraum

msr **25** (1982) H. 6, S. 306–310

Der Beitrag gibt einen Überblick über numerische Verfahren zum Entwurf optimaler Mehrgrößenregelungen im Zustandsraum. Proportionale Ausgangsrückführungen bilden dabei den Schwerpunkt. Ausgehend vom Stand der Literatur werden die Lösungsansätze zusammengestellt und anhand vorliegender eigener Erfahrungen gewertet. Auf offene Probleme wird hingewiesen.

Zietz, H.: IA 2.3.1.7.

Vorschlag für eine allgemeine Koppelfunktion der Mehrgrößenstrecke und der Mehrgrößenregelung und Darstellung ihrer Eigenschaften am Beispiel der Dreigrößenregelung

msr **25** (1982) H. 6, S. 311–314

Von der Determinante der Übertragungsmatrix der Mehrgrößenstrecke und der Rückführdifferenzmatrix der Mehrgrößenregelung wedren eine allgemeine Koppelfunktion der Mehrgrößenstrecke und der Mehrgrößenregelung abgeleitet. Die eingeführten Koppelfunktionen eignen sich gut, die Kopplung des Gesamtsystems einzuschätzen, kopplungsbedingte Schwierigkeiten (Allpaßverhalten) zu erkennen und auf dieser Grundlage Schlußfolgerungen für die zweckmäßige Regelungsstruktur zu ziehen.

Zonkov, S. M.: IA 2.6.

Systeme mit Vergleichsmodell und veränderlicher Struktur

msr **25** (1982) H. 6, S. 315–318

Die Realisierung parameteradaptiver Regelungssysteme mit Vergleichsmodell erfordert einen erheblichen gerätetechnischen Aufwand. Eine Reduzierung des Aufwandes erreicht man durch Einbeziehung der Entwurfsprinzipien für Systeme mit veränderlicher Struktur, insbesondere des Gleitzustandes, wobei neue, qualitativ bessere Eigenschaften gegenüber den Grundvarianten entstehen.

Biedermann, D.: IA 2.3.1.7.

Verfahren der dezentralen Eigenwertverschiebung

msr **25** (1982) H. 6, S. 318–321

Ausgehend von einer graphentheoretischen Untersuchung der Beeinflußbarkeit der Eingangsvektoren einzelner Teilregler durch die Ausgangsvektoren der übrigen Teilregler wird eine Zerlegung der in Zustandsraumbeschreibung vorliegenden Regelstrecke in Teilsysteme vorgenommen. Das Problem der dezentralen Eigenwertverschiebung kann damit durch eine unabhängig voneinander ausführbare zentrale Eigenwertplazierung in den Teilsystemen ersetzt werden.

Reinhardt, H.: IA 4.0.5.2.

Dedizierte Prozeßdatensimulation — ein Beitrag zur Programmentwicklung auf Testprozeßrechnern

msr **25** (1982) H. 6, S. 322–325

Ausgehend vom „Software-Problem" beim Einsatz von Prozeß- und Mikrorechnern und einem Überblick der Aktivitäten zu seiner Lösung wird auf den Einsatz von Testprozeßrechnern zur Programmentwicklung eingegangen. Zur Erweiterung ihrer Anwendbarkeit wird das Verfahren der dedizierten Prozeßdatensimulation begründet und erläutert. Sein Prinzip besteht in der Schaffung einer aufgabenspezifischen Testumgebung durch entsprechende software- und hardwareseitige Entwicklungen.

Bandemer, H.; Wächtler, M.: IA 4.1.4.

Entscheidungstheoretische Optimierung von Beobachtungs- und Entscheidungsverfahren für Zuverlässigkeitsprüfungen von Erzeugnissen

msr **25** (1982) H. 6, S. 326–332

Betrachtet werden Verfahren zur Beobachtung des Ausfallverhaltens von Erzeugnissen, um deren Zuverlässigkeit einzuschätzen. Vom Beobachtungsergebnis ist abhängig, ob die Erzeugnisse ausgeliefert werden (Annahme) oder ob sie zunächst weiteren Maßnahmen zu unterziehen sind (Ablehnung). Derartige Beobachtungs- und Entscheidungsverfahren bedingen Kosten, bestehend aus den Aufwendungen für die Durchführung der Prüfung (Prüfkosten) einerseits und den ökonomischen Konsequenzen infolge einer der möglichen Entscheidungen (Entscheidungskosten) andererseits. Ein mathematischer Apparat auf der Grundlage der statistischen Entscheidungstheorie zur Bestimmung kostengünstiger Beobachtungs- und Entscheidungsverfahren wird vorgestellt.

РЕЗЮМЕ

Früchtel, G.: ИА 5.6.3.

Применение обучаемых структур управления для эффективного использования статичееких алгоритмов оптимизации процесса для непосредственного управления процессом

msr **25** (1982) № 6, стр. 302–306

При непосредственном управлении технологическими процессами статические алгоритмы оптимизации процесса не могут быть эффективно применены в том случае, если необходимы быстрые вмешательства управления в то время, когда расчеты оптимизации требуют большого времени, Предлагается связь между статической оптимизацией и обучаемыми элементами, которые разрабатывают аппроксимирующий закон управления, обеспечивающий до наличия оптимального решения быстрые, субоптимальные реакции управления.

Küßner, K.; Martin, K.: ИА 2.3.1.0.

Обзор числовых способов разработки оптимального регулирования в пространетве состояний

msr **25** (1982) № 6, стр. 306–310

Статья дает обзор числовых способов разработки оптимального регулирования по нескольким параметрам в пространстве состояний. При этом пропорциональные выходные обратные связи находятся в центре внимания. Исходя из состояния литературы составлены законы решений и оценены на основе имеющегося собственного опыта. Обращают внимание на окрытые проблемы.

Zietz, H.: ИА 2.3.1.7.

Предложение для общей функции связи промежутка по нескольким параметрам и регулирования по нескольким параметрам и изображения их свойств на примере регулирования трех величин

msr **25** (1982) № 6, стр. 311–314

Из детерминатна матрицы передачи промежутка по нескольким параметрам и разностной матрицы обратной связи регулирования по нескольким параметрам выведены общая функция связи промежутка по нескольким параметрам и регулирования по нескольким параметрам. Использованные функции связи хорошо пригодны для оценки связи общей системы, распознавания затруднений, вызванных связью, (поведение согласования) и для выводов для целесообразной структуры регулирования.

Zonkov, S. M.: ИА 2.6.

Системы со сравнительной моделью и переменной структурой

msr **25** (1982) № 6, стр. 315–318

Реализация параметрически адаптивных систем регулирования со сравнительной моделью требует значительных аппаратурных затрат. Сокращение затрат достигается путем включения принципов разработки систем с переменной структурой, в частности состояния скольжения, причем получаются новые свойства с улучшенным качеством по сравнению с основными вариантами.

Biedermann, D.: ИА 2.3.1.7.

Способ децентрального смещения собственного значения

msr **25** (1982) № 6, стр. 318–321

Исходя из графотеоретического исследования воздействия входных векторов отдельных частичных регуляторов выходными векторами остальных частичных регуляторов произведена разбивка имеющегося в описании пространства состояний объекта регулирования на частичные системы. Таким образом проблема децентрального смещения собственного значения может быть заменена центральным размещением в частичных системах, выполняемым независимо друг от друга.

Reinhardt, H.: ИА 4.0.5.2.

Дедицированное моделирование параметров процесса — вклад в разарботку программ на тест-УВМ

msr **25** (1982) № 6, стр. 322–325

Исходя из „проблемы математического обеспечения" при применении УВМ и микро-ВМ, а также обзора мероприятий по ее решению останавливают на применении тест-УВМ для разработки программ. С целью расширения их применяемости обоснован и пояснен способ дедицированного моделирования параметров процесса. Его принцип заключается в создании специфической окружающей тест-среды в взаисимости от заданий путем соответствующих разработок в области математического и аппаратурного обеспечений.

Bandemer, H.; Wächtler, M.: ИА 4.1.4.

Решающая теоретическая оптимизация методов различения и наблюдения для испытаний надежности изделий

msr **25** (1982) № 6, стр. 326–332

Рассмотрены методы наблюдения поведения отказов изделий с целью оценки их надежности. От результата наблюдения зависит, будет ли поставлено изделие или нет (предположение), или должны ли они сперва подвергаться другим мероприятиям (отклонение). Такие методы наблюдения и решения требуют расходов, состоящих из расходов для проведения испытания (расходы на испытание) с одной стороны и из экономических последовательностей вследствие одного из возможных решений (расходы на решение) с другой стороны. Представлен математический аппарат на основе статистической теории решений для определения способов (методов) наблюдения и решения с выгодными расходами.

SUMMARIES

Früchtel, G.: IA 5.6.3.

Application of Learning Control Structures for the More Efficient Use of Static Process Optimization Algorithms in On-line Process Control

msr 25 (1982) No. 6, pp. 302—306

In on-line process control of technological processes static process optimization algorithms may not be efficiently used if rapid control inputs are necessary in spite of time-consuming optimization calculations. Therefore the author proposes the coupling of static optimization with learning elements producing an approximated control law for suboptimal control inputs to be used for the time necessary for calculating the optimal solution.

Kißner, K.; Martin, K.: IA 2.3.1.0.

Survey on Numerical Methods for the State-Space Design of Optimal Feedback Controls

msr 25 (1982) No. 6, pp. 306—310

The authors give a survey on numerical methods for the design of optimal multivariable feedback controls in state space, with this proportional output feedback forming the main point of consideration. Starting from the state of the art in literature the authors put together the solution statements and evaluate them by means of own experiences, open problems being pointed out.

Zietz, H.: IA 2.3.1.7.

Proposal for a General Coupling Function of the Multivariable Plant and Multivariable Feedback Control and Its Application to the Example of a Three-Variable Feedback Control

msr 25 (1982) No. 6, pp. 311—314

A general coupling function of the multivariable plant and the multivariable feedback control is derived from the determinant of the transfer matrix of the multivariable plant and the feedback difference matrix of the multivariable feedback control. The coupling functions introduced are well suited for estimating the coupling of the overall system, recognizing difficulties due to the coupling (all-pass behavior) and, on this basis, deriving conclusions for a reasonable feedback control structure.

Zonkov, S. M.: IA 2.6.

Systems with Reference Model and Variable Structure

msr 25 (1982) No. 6, pp. 315—318

The implementation of parameter adaptive feedback control systems with reference model requires considerable technical expense. The latter may be reduced by incorporating the design principles for variable structure systems, particularly the gliding state, thus in comparison with the basic variant new qualitatively better characteristics arising.

Biedermann, D.: IA 2.3.1.7.

Methods of the Decentral Eigenvalue Shifting

msr 25 (1982) No. 6, pp. 312—321

Starting from a graph-theoretical study of the influencibility of the input vectors of individual partial controllers by the output vectors of the remaining partial controllers the plant described in state space is decomposed into partial systems. With this, the problem of the decentral eigenvalue shifting may be replaced by a central eigenvalue allocation in the partial systems which is carried out independently one upon the other.

Reinhardt, H.: IA 4.0.5.2.

Dedicated Process Data Simulation — a Contribution to the Programme Development on Test Process Computers

msr 25 (1982) No. 6, pp. 322 —325

Starting from the software problem with the application of process computers and microcomputers and from a survey on the activities for its overcoming the author deals with the use of test process computers for the programme development. For the extension of their applicability the method of the dedicated process data simulation is founded and explained. Its principle consists in establishing a problem-oriented test environment by corresponding software and hardware developments.

Bandemer, H.; Wächtler, M.: IA 4.1.4.

Decision-Theoretical Optimization of Observation and Decision Procedures for Product Reliability Tests

msr 25 (1982) No. 6, pp. 326—332

The authors consider methods for the observation of the failure behavior of products in order to estimate their reliability. The observation result determines whether the products are delivered up or, for the present, must be subjected to further measures. Such observation and decision methods cause costs for test execution and decision consequences. The authors present a mathematical framework based on statistical decision theory for the determination of economical observation and decision methods.

RÉSUMÉS

Früchtel, G.: IA 5.6.3.

L'emploi de structures de commande à apprentissage pour l'utilisation plus efficace d'algorithmes d'optimisation statistiques dans la commande de processus on-line

msr 25 (1982) No. 6, pp. 302—306

Près la commande de processus on-line de processus technologiques, des algorithmes d'optimisation statiques ne peuvent être appliqués efficacement si des entrées de commande rapides sont nécessaires malgré le calcul d'optimisation de longue durée. C'est pourquoi, l'auteur propose le couplage de l'optimisation statique avec des éléments à apprentissage élaborant une loi de commande approchée qui rend rapidement possible des signaux de commande sub-optimaux utilisés jusqu'à l'obtention de la solution optimale.

Kißner, K.; Martin, K.: IA 2.3.1.0.

L'aperçu sur des méthodes numériques pour le projet de réglages optimaux en espace d'état

msr 25 (1982) No. 6, pp. 306—310

La contribution donne un aperçu sur des méthodes numériques pour le projet en espace d'état de réglages multivariables optimaux. Des retours de sortie proportionnels y forment le point principal de la considération. A partir de l'état présent de la littérature, les auteurs mettent ensemble les propositions de solution et les évaluent à l'aide d'expériences personnelles. Des problèmes encore existant sont mentionnés.

Zietz, H.: IA 2.3.1.7.

Une proposition pour une générale fonction de couplage de l,objet multivariable et du réglage multivariable et son emploi à l'example d'un réglage à trois variables

msr 25 (1982) No. 6, pp. 311—314

Une générale fonction de couplage de l'objet multivariable et du réglage multivariable est dérivée à partir du déterminant de la matrice de transfert de l'objet multivariable et de la matrice de différence de retour du réglage multivariable. Les fonctions de couplage introduites sont bien aptes à l'estimation du couplage du système total, à la reconnaissance de difficultés causées par le couplage (comportement avec déphasage pur) et, sur cette base, à des conclusions pour une raisonnable structure de réglage.

Zonkov, S. M.: IA 2.6.

Des systèmes à modèle de référence et à structure variable

msr 25 (1982) No. 6, pp. 315—318

La réalisation de systèmes de réglage paramétriquement adaptifs à modèle de référence exige une considérable dépense technique. Elle peut être réduite par incorporation des principes de projet pour des systèmes à structure variable, particulièrement de l'état de glissement où de nouvelles caractéristiques résultent qui sont qualitativement meilleures en comparaison avec les variantes de base.

Biedermann, D.: IA 2.3.1.7.

Des méthodes du déplacement décentral des valeurs propres

msr 25 (1982) No. 6, pp. 318—321

A partir d'une étude graphe-théorique de l'influencibilité des vecteurs d'entrée de régulateurs partiels individuels par les vecteurs de sortie des restants régulateurs partiels, l'objet à asservir décrit en espace d'état est décomposé dans des systèmes partiels. Avec cela, le problème du déplacement décentral des valeurs propres peut être remplacé par une allocation centrale des valeurs propres dans les systèmes partiels qui peut être exécutée indépendamment l'une de l'autre.

Reinhardt, H.: IA 4.0.5.2.

La simulation dédicacée de données de processus — une contribution au développement de programme sur des ordinateurs de processus de test

msr 25 (1982) No . 6, pp. 322—325

A partir du problème de logiciel près l'emploi d'ordinateurs de processus et de micro-ordinateurs ainsi que d'un aperçu sur des activités pour sa solution, l'auteur traite l'application de calculateurs de processus de test pour le développement de programme. Pour l'extension de leur applicabilité, la méthode de la simulation dédicacée de données de processus est fondée et expliquée. Son principe consiste dans l'établissement des environs de test orientés sur problème par de correspondants développements de software et de hardware.

Bandemer, H.; Wächtler, M.: IA 4.1.4.

L'optimisation décision-théorique de méthodes d'observation et de décision pour le test de fiabilité de produits

msr 25 (1982) No. 6, pp. 326—332

Les auteurs considèrent des méthodes pour l'observation du comportement de défaillance de produits pour estimer leur fiabilité. Le résultat d'observation détermine si les produits sont délivrés ou, tout d'abord, soumis à d'ultérieures mesures. Telles méthodes d'observation et de décision causent des frais pour l'exécution de test et les conséquences de décision. Les auteurs présentent un outil mathématique sur la base de la théorie de décision statistique pour la détermination de méthodes d'observation et de décision économiques.

15936 6 APW 4011 7001 1003
159 549 964
SHAT 11

robotron

Bürocomputer
A 5110/ A 5120/ A 5130

Universelle Geräte der Generation moderner Bürocomputer für alle Belange der Abrechnung, Buchführung und Datenerfassung und -verarbeitung speziell für den Einsatz am Arbeitsplatz entwickelt.

VEB Robotron-Vertrieb
Berlin
DDR-1080 Berlin
Mohrenstraße 62

Exporteur:
Robotron Export-Import
Volkseigener
Außenhandelsbetrieb der
Deutschen
Demokratischen Republik
DDR-1080 Berlin
Friedrichstraße 61

Besuchen Sie uns bitte auf der Leipziger Herbstmesse, Halle 12.12

Vorteile, die für sich sprechen:

- Programmpakete für anwenderorientierte Problemlösungen
- leistungsfähiges Betriebssystem, COBOL- und PASCAL-Compiler
- arbeitsplatzorientierte, variable, kombinationsfähige und leistungsstarke Formulartechnik für Leporello, Journalrolle, Einzelblatt und Kontokarten, geteilte Walze
- einfache Bedienung und hohe Sicherheit durch Spezialterminals
- hervorragendes Druckbild durch Typenrad- oder Mosaikdrucker 132 oder 210 Zeichen/Zeile
- moderne Zentraleinheit auf Basis eines 8-Bit-Mikroprozessors
- modulare Zentralspeicherkapazität bis 64 KB in C- und N-MOS
- vielseitige Peripherie durch Floppy Disk, Minifloppy, Kassettenmagnetband, Bildschirm und Zeilendisplay
- Datenübertragungsschnittstelle für den Einsatz als intelligentes Terminal